

XXI 57-1

Institut für Baustoffkunde und Materialprüfung
Technische Hochschule Braunschweig

2107



Bestimmung des dynamischen Elastizitätsmoduls
und des Verlustfaktors verbreiteter Baustoffe

von

o.Prof. Dr.-Ing. habil. Th. Kristen
Dr.-Ing. H.W. Müller

1958

JK 620.172.225 : 0015

Die Untersuchungen wurden durchgeführt im Auftrage
und mit Unterstützung des Herrn Bundesministers für
Wohnungsbau. - Az: II - 4116 Nr. 6

Inhaltsübersicht

	Seite
1. Einleitung	1
1.1 Bedeutung der Elastizitätskonstanten in der Bauakustik und Ziel der Untersuchungen	1
1.2 Begriffserklärung und Abgrenzung der Untersuchungen	3
2. Statische Zugelastizität der Baustoffe	8
2.1 Bekannte Elastizitätserscheinungen bei Beton	8
2.2 Versuchsanordnung für Dehnungsmessungen	12
2.21 Meßbedingungen und Eigenschaften der Versuchskörper	12
2.22 Dehnungsmeßeinrichtung	19
2.23 Versuchsdurchführung	21
2.3 Meßergebnisse	23
2.4 Bemerkenswerte Randerscheinungen	26
2.41 Einfluß von Schwingungen und Feuchtigkeit auf den stat. Elastizitätsmodul	26
2.42 Temperaturabhängigkeit des stat.E-Moduls	29
2.43 Beton-Elastizität in Abhängigkeit vom Alter	33
2.5 Besprechung der Meßergebnisse	33
3. Grundsätzliches über Schwingungen in Festkörpern	35
4. Bestimmung des dynamischen Elastizitätsmoduls	39
4.1 Meßverfahren und Versuchsdurchführung	40
4.2 Versuchsergebnisse	42
4.3 Abhängigkeit der dynamischen Elastizität von äußeren Einflüssen	46
4.31 Einfluß der Feuchtigkeit	46
4.32 Einfluß der Mörtelschichten und Mörtelfugen	47
4.4 Besprechung der Meßergebnisse	49
5. Bestimmung der Energieverluste	50
5.1 Meßverfahren und Versuchsdurchführung	50
5.2 Versuchsergebnisse	51
5.3 Abhängigkeit der Dämpfung von äußeren Einflüssen	55
5.31 Einfluß der Feuchtigkeit	55
5.32 Einfluß von Mörtelschichten und Mörtelfugen	57
5.4 Besprechung der Versuchsergebnisse	57
6. Zusammenfassung	58
6.1 Statische Untersuchungen	58
6.2 Dynamische Untersuchungen	60

1. Einleitung

1.1 Bedeutung der Elastizitätskonstanten in der Bauakustik und Ziel der Untersuchungen

Mit der Ausbreitung der Massivbauweise und der wirtschaftlich bedingten zunehmenden Einengung der statischen Reserven wurde der Schallschutz im Wohnungsbau zu einem vordringlich zu lösenden volksgesundheitlichen Problem. Der Gesetzgeber strebt daher an, durch Einführung der DIN 4109 als Pflichtnorm der Bauaufsicht, für die Mieter schalltechnisch erträgliche Wohnungen zu schaffen. Die im Beiblatt zur DIN 4109 genannten Konstruktionen mit einem ausreichenden Schallschutz sind bis zum Jahre 1952 auf Grund empirisch gewonnener Ergebnisse zusammengestellt worden, da in der Bauakustik, die als eine der jüngsten wissenschaftlichen Disziplinen gilt, die Energieübertragung noch nicht ausreichend in exakte Formeln zu fassen war.

Die Komplikation einer gesetzmäßigen Erfassung der Schalldämmung in Bauwerken liegt darin, daß es bisher nicht gelungen ist, die den Schallschutz einer Wand- oder Deckenkonstruktion stets beeinflussende Körperschallübertragung allgemein gültig zu erfassen. Während die Luftschalluntersuchungen bereits von Berger in den Jahren 1907 bis 1910 begonnen wurden, sind die Forschungen zur Aufklärung der Körperschallausbreitung in Bauteilen erst um 1934 aufgenommen worden, und leider befanden sie sich bis zum Jahre 1950 noch im Anfangsstadium, bis sie von Meyer, Parkin, Oberst u. Purkis (24) mit gutem Erfolg wieder aufgenommen wurden. Um die vorhandene Lücke auszufüllen, wird gegenwärtig international der Schwerpunkt auf die Festlegung der Systematik der Körperschallübertragung gelegt.

Innerhalb der letzten Jahre wurde von verschiedenen Forschern versucht, die Schallübertragung beispielsweise schwimmender Estriche (1) oder von ein- und zweischaligen Platten (2,3,4,5) rechnerisch zu bestimmen. Bei diesen Berechnungen war es erforderlich, die in Bauwerken stets vorliegende unübersichtliche mechanische Kopplung der einzelnen Bauelemente zu

idealisieren. Dennoch sind die Ergebnisse bereits als Fortschritte in der bauakustischen Entwicklung zu werten. In allen theoretischen Betrachtungen der Schallübertragung im Bauwesen ist immer die Biegesteife bzw. der Elastizitätsmodul des jeweiligen Baustoffes enthalten, während für die Körperschallausbreitung noch zusätzlich die Dämpfungsgröße des Baustoffes maßgeblich ist. Da bis zum gegenwärtigen Zeitpunkt im allgemeinen die bauakustischen Berechnungen noch auf den genannten Stoffgrößen für Ziegel, Beton und Stahl basieren, die im Jahre 1934 von R. Schmidt (6) gewonnen wurden, war es nach Ansicht des Verfassers erforderlich, diese Werte den Fortschritten der Bautechnik entsprechend für eine größere Anzahl von Baustoffen zu ergänzen. Durch zusätzlich seit dem Jahre 1934 gewonnene Erkenntnisse über das Verhalten von Biegewellen in festen Körpern war es möglich, auf Grund von Parallelmessungen die Bestimmungsgenauigkeit der Stoffkonstanten zu erhöhen.

Während bei Schwingungsbetrachtungen der dynamische Elastizitätsmodul herangezogen werden muß, so ist bei Materialbeanspruchungen mit gleichbleibender Kraftrichtung der entsprechende statische Elastizitätsmodul anzuwenden. Beide Elastizitätsmoduln können je nach der Größe der Energiedämpfung innerhalb des Baustoffes verschiedene Werte annehmen. Daher sollten im Rahmen der folgenden Untersuchungen sowohl für statische als auch für dynamische Beanspruchungen gewisse elastische Eigenschaften von Baustoffen miteinander verglichen werden.

Die Bauelemente werden in der Praxis nicht nur im akustischen Sinne dynamisch beansprucht, sondern sie führen auch bei Erschütterungen durch den Straßen- und Schienenverkehr oder bei atmosphärischen Bewegungen (Wind) Schwingungen aus. Dagegen erwiesen sich die statischen Elastizitätseigenschaften als eine wichtige Stoffgröße beim Verhalten der Baustoffe gegenüber allen Formänderungen wie Wärmedehnung, Frosteinflüssen, Reißneigung und speziell auch beim Schwinden und Quellen. Von den hier untersuchten Baustoffen wird am Bau-

werk selbst im allgemeinen nur Beton einer konstanten Zugbelastung ausgesetzt, so daß auch hier bei Festigkeitsberechnungen der statische Elastizitätsmodul angewandt werden muß.

Mit der Gegenüberstellung der statischen und dynamischen Elastizitätseigenschaften verschiedenartiger Baustoffe sollen die im folgenden beschriebenen Untersuchungen dazu beitragen, die Grundlagen der quantitativen Erfassung der Schallübertragung in Festkörpern zu vervollständigen und aus den sich ergebenden Folgerungen zahlenmäßige Unterlagen für schwingungstechnische und statische Berechnungen im Hochbau zu schaffen.

1.2 Begriffserklärung und Abgrenzung der Untersuchungen

Besitzt ein Körper an allen Punkten die gleichen physikalischen Eigenschaften wie Dichte, Festigkeit, Struktur, so wird er als homogen bezeichnet. Im Gegensatz dazu nennt man Körper, deren Eigenschaften sich makroskopisch örtlich unterscheiden, inhomogen oder heterogen.

Zu der letztgenannten Gruppe der Festkörper sind auch die Baustoffe zu zählen. Dichte, Festigkeit und Struktur sind bei ihnen nicht einheitlich. Hinzu kommt bei diesen Stoffen, daß sie meist von Versuchskörper zu Versuchskörper eine mehr oder weniger schwankende Zusammensetzung besitzen; denn in den Herstellungsprozeß der meisten Baustoffe sind nochmals chemische Reaktionen einbegriffen, die in der Gesamtheit einer Lieferung eines bestimmten Baustoffes selten gleichwertig wirken. Daher liegt es in der Natur der gewählten Versuchskörper, daß bei ihnen nicht wie beispielsweise bei Metallen oder definierten Verbindungen exakte Stoff-Konstanten angebbar sind. Je nach dem Grad der Einheitlichkeit des Aufbaues werden die Stoffkonstanten Schwankungen unterworfen sein. Um den naturbedingten Streubereich möglichst eng abzugrenzen, werden die Versuchsobjekte durch die Angabe zusätzlicher Eigenschaften wie Raumgewicht, Feuchtigkeitsgehalt und soweit wie möglich auch durch Nennung der Druckfestigkeit und der Biegezugfestigkeit charakterisiert. Daher können die erhaltenen Meßgrößen unter Berücksichtigung der angegebenen Meßstreuungen

als Stoffkonstante bezeichnet werden. Die Grenzen der Schwankungen für Baustoffe, die gegenüber den untersuchten eine abweichende Konsistenz zeigen, lassen sich nicht angeben. Dagegen können die Elastizitätskonstanten für Baustoffe mit übereinstimmendem Raumbgewicht und gleichwertiger Festigkeit bei Berechnungen eingesetzt werden. Wie die Untersuchungen zeigten, sollte bei der Wahl der Rechnungsgrößen der Feuchtigkeitsgehalt, die Temperatur und das Alter der Baustoffe berücksichtigt werden, da diese Faktoren einen Einfluß auf die festgestellten Konstanten besitzen.

Es ist bekannt, daß jeder Festkörper seine Gestalt unter der Einwirkung äußerer Kräfte verändert. Dieser Formänderung setzen zwischenmolekulare Kräfte, also von Stoffteilchen zu Stoffteilchen wirkende Kräfte, einen Widerstand entgegen. Ein Körper wird als elastisch angesprochen, wenn diese Bindungskräfte nach Aufhören der äußeren Krafteinwirkung den ursprünglichen Formzustand wieder herzustellen vermögen. Überschreiten die äußeren Kräfte beim elastischen Körper die zwischenmolekularen Kräfte, dann geht er in den plastischen Zustand über, oder es tritt ein Bruch ein.

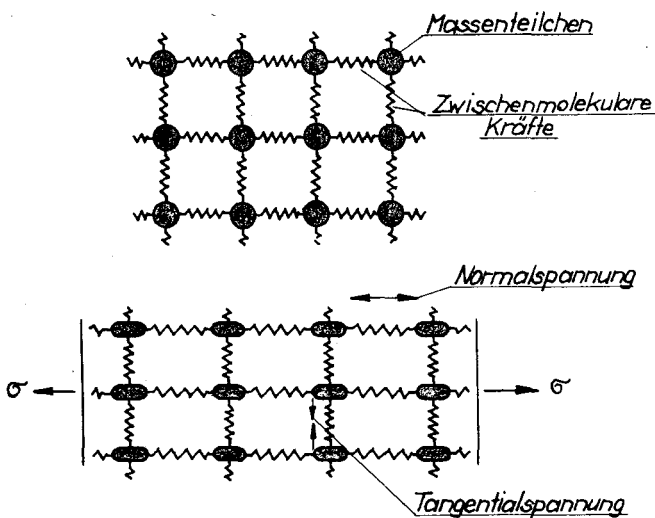


Abb. 1 Schematische Darstellung eines unbelasteten und belasteten elastischen Körpers

Die zwischenmolekularen Kräfte, oder auch Oberflächenkräfte, lassen sich beispielsweise bei der Zugbeanspruchung eines Stabes in eine in Normalrichtung wirkende Komponente und eine in Tangentialrichtung wirkende Komponente zerlegen. Entsprechend werden diese Kräfte Normal- und Tangentialspannungen genannt, die an jedem Querschnittselement des Stabes wirksam sind. Bei einer Zugbeanspruchung verursachen die Normalkräfte die Dehnung und die Tangentialkräfte die Querverkürzung (s. Abb. 1).

Nach dem Hooke'schen Gesetz sind die Spannungen den Dehnungen bzw. den Stauchungen der Körper in Kraftrichtung proportional. Dieses Gesetz gilt jedoch im allgemeinen nur für kleine Deformationen, und zwar bis zur Proportionalitätsgrenze. Die Proportionalitätsgrenze fällt meist mit der Elastizitätsgrenze zusammen. Gemäß einer allgemein gültigen Festlegung gilt als Elastizitätsgrenze jene Spannung, bei der die verbleibende Deformation $0,3 \cdot 10^{-4}$ beträgt. An die Proportionalitätsgrenze schließt sich ein Gebiet an, in dem die Deformationen nicht mehr linear mit den Spannungen wachsen, sondern mit einer höheren Potenz. Baustoffe, die eine relativ geringe Festigkeit besitzen, zeigen einen kleinen elastischen Bereich. Die im Bauwesen bei ihnen vorkommenden Spannungen bewegen sich dennoch bei den gültigen Sicherheiten innerhalb dieses Bereiches, so daß auch die Untersuchungen auf dieses Gebiet beschränkt wurden, und somit die lineare Abhängigkeit zwischen Spannung und Verzerrung hier vorausgesetzt werden konnte.

Die an einem Festkörper eintretenden Deformationen sind Funktionen der Spannung. Je nach der speziellen Art der Formänderungen werden verschiedene Elastizitätskonstanten unterschieden, die aber im allgemeinen nicht von einander unabhängig sind. Je größer der Symmetriegrad der Materialstruktur ist, um so kleiner ist die Zahl der unabhängigen Konstanten. Im Bereich der Gültigkeit des Hooke'schen Gesetzes gibt es für das ideal elastische isotrope Kontinuum nur zwei unabhängige Elastizitätskonstanten, die vollkommen die elastischen Eigenschaften dieses Körpers charakterisieren, während die genaue Kennzeichnung des elastischen Verhaltens realer Stoffe wesentlich mehr Angaben erfordert.

Die beiden von einander unabhängigen Elastizitätskonstanten, die im allgemeinen für den isotropen, homogenen Festkörper zu Grunde gelegt werden, sind:

E = Elastizitätsmodul der Längenänderung oder auch Young'scher Modul in kg/cm^2 *)

*) Grundsätzlich werden sämtliche Meßgrößen im technischen Maßsystem angegeben. Da im Baufach das Kilopond mit dem Kilogramm (-gewicht) gleichgesetzt wird, werden auch hier die Krafteinheiten in Kilogramm (-gewicht) angegeben.

G = Schub-, Torsions- oder Gleitmodul in kg/cm^2 .

Aus E und G läßt sich für den isotropen Körper die Poisson'sche Zahl μ aus $G = \frac{E}{2(1+\mu)}$ berechnen.

Mit Hilfe dieser Größen läßt sich der gesamte Verzerrungszustand eines homogenen Festkörpers beschreiben.

Bei einer dynamischen, longitudinalen oder transversalen Beanspruchung der Festkörper treten prinzipiell dieselben Kräfteerscheinungen an ihnen auf, jedoch mit dem Unterschied, daß ein ständiger Richtungswechsel bzw. ein periodisches Anwachsen und Abnehmen der Normal- bzw. Tangentialkraft vorliegt.

Schon bei langsam verlaufenden Deformationen z.B. in Gasen und Flüssigkeiten führt die Übertragung der Bewegung durch die Moleküle zu einer Zähigkeitsreibung. Wenn aber die zeitliche Dauer der Deformationen vergleichbar wird mit der Einstelldauer des inneren Gleichgewichtes, so treten in Gasen und Flüssigkeiten Relaxationserscheinungen auf. In festen Körpern ist in diesem Falle eine mit innerer Reibung verknüpfte elastische Nachwirkung zu beobachten, die durch eine Überlagerung einfacher Relaxationserscheinungen hervorgerufen wird (9). Die Ursache des unterschiedlichen statischen und dynamischen Elastizitätsverhaltens der Festkörper ist zum Teil in den erwähnten Relaxationserscheinungen und in der damit verbundenen mechanischen Hysterese zu sehen. Diese elastischen Nachwirkungerscheinungen können darauf zurückgeführt werden, daß die Deformationsgeschwindigkeit $\frac{d\varepsilon}{dt}$ eines Materials sich nicht immer im gleichen Verhältnis der Spannungsveränderlichkeit $\frac{d\sigma}{dt}$ anpassen kann.

Der Mangel der bisher verwandten statischen Meßverfahren zur Bestimmung des Elastizitätsmoduls wurde zuerst in der Seismologie bemerkt. Es konnte festgestellt werden, daß nach seismologischen Beobachtungen, die mit statischen Verfahren ermittelten Elastizitätsmoduln der Gesteine der Erdschichten für die Erklärung des Erdbebenverlaufes nicht zutreffend waren. Die daraufhin mit Hilfe der Ausbreitungsgeschwindigkeit von Longitudinalwellen ermittelten Elastizitätsmoduln ergaben eine gute Übereinstimmung (10).

Ein Vergleich der statisch und dynamisch festgestellten Elastizitätsmoduln desselben Körpers hat gezeigt, daß die dynamischen Elastizitätsmoduln im allgemeinen größere Werte aufweisen und darüberhinaus in den meisten Fällen noch von der Frequenz und der Temperatur abhängig sind (11).

Vor Beginn der schwingungstechnischen Untersuchungen erhob sich die Frage, ob die theoretischen Voraussetzungen der Kontinuumtheorie, die bereits eine gewisse Vereinfachung der exakten Kristallgittertheorie darstellt, bei den inhomogenen Baustoffen anwendbar sind. Beim Beton ist beispielsweise mit örtlichen Inhomogenitäten bis zu 20 mm zu rechnen. Die Messungen bestätigen aber, daß diese Ungleichmäßigkeiten im Aufbau der Versuchskörper ohne Einfluß auf die Meßergebnisse sind, solange die Wellenlänge der jeweiligen Schwingungsform groß gegenüber den Dichteschwankungen des Versuchsmaterials ist. Die kürzeste Wellenlänge betrug innerhalb des untersuchten Frequenzbereiches etwa 50 cm.

Im Hinblick auf das Ziel der Untersuchungen, nämlich die Voraussetzungen für bauakustische Berechnungen zu schaffen, wurde von den genannten Elastizitätskonstanten lediglich der Elastizitätsmodul bestimmt. In engem Zusammenhang mit dem elastischen Verhalten eines Festkörpers stehen auch seine energiedämpfenden und energiefortleitenden Eigenschaften, die daher zu den Elastizitätseigenschaften zu zählen sind. Diese Eigenschaften werden durch die Verlustzahl bzw. durch die Körperschallgeschwindigkeit charakterisiert.

Als Kenngröße für die Dämpfung wird die Verlustzahl bestimmt. Die Verlustzahl ist ein Maß für die inneren Energieverluste des Körpers. Sie gibt den Teil der Schwingungsenergie an, der in der Zeiteinheit durch Umwandlung in Wärme oder in andere Energieform innerhalb des Körpers verlorenggeht. Der Energieanteil, der durch Schallabstrahlung abgegeben wird, kann wegen seines geringen Betrages dabei vernachlässigt werden. Aus der Verlustzahl lassen sich durch einfache Umrechnung das logarithmische Dekrement und die zeitlichen und räumlichen Dämpfungen angeben.

Die Biegewellengeschwindigkeit konnte mit der vorhandenen

Versuchseinrichtung nicht bestimmt werden. Da die Gültigkeit der Elastizitätstheorie durch die ausgeführten Untersuchungen auch für Baustoffe bestätigt werden konnte, kann diese aus den Wellenlängenbestimmungen errechnet werden.

Die Bestimmung der genannten elastischen Konstanten beschränkte sich auf Baustoffe, die entsprechend ihrer Häufigkeit in der Praxis und ihrer Eignung für die Herstellung der erforderlichen Versuchskörper ausgewählt wurden. Eine Aufzählung der untersuchten Baustoffe erfolgt in Absatz 2.21.

2. Statische Zugelastizität der Baustoffe

Als Grundlage der schwingungstechnischen Untersuchungen dienten statische Elastizitätsmessungen mit Hilfe eines gebräuchlichen Verfahrens. Der von den meisten Forschern verfolgte Weg zur Bestimmung des statischen Elastizitätsverhaltens von Baustoffen besteht in der Bestimmung der Stauchung bei Druckbelastungen. Für Beton beispielsweise reicht die Genauigkeit dieses Verfahrens bis zu einer Belastung von $\frac{2}{3}$ der Würfeldruckfestigkeit aus, da bis zu dieser Grenze die Proportionalität zwischen Spannung und Stauchung mit ausreichender Genauigkeit erfüllt ist. Bei Überschreitung der angegebenen Grenze wird der statische Elastizitätsmodul im allgemeinen für verschiedene Spannungsbereiche angegeben.

Die Gesetzmäßigkeiten zwischen den Spannungen und den zugeordneten Längenänderungen sind vor allem für die verschiedenen Betonarten als bekannt anzusehen (12,13,14), da die Herstellung von Beton nicht örtlich gebunden und seine Zusammensetzung gut definierbar ist. Um allgemein gültige Beziehungen festzulegen, ist es erforderlich, die entsprechenden Untersuchungen an mehr als einem Versuchskörper mit definierten Eigenschaften und Lagerungs- sowie Herstellungsbedingungen vorzunehmen.

2.1 Bekannte Elastizitätserscheinungen bei Beton

Die Bestrebungen, den Elastizitätsmodul von Beton in einen Zusammenhang zur Würfel- oder Prismendruckfestigkeit zu

bringen, gehen auf Schüle und Bach zurück. Von ihnen wurde bereits für den Praktiker eine gute Näherungsformel gefunden. Aus den Ergebnissen der Knickversuche von Graf an Betonsäulen wurde dann die Ritter-Möhrsche Gleichung:

$E = 1000(1,25 \sigma_{Pd} - \sigma)$ abgeleitet, in der der Elastizitätsmodul in Abhängigkeit von der Spannung σ aus der Prismendruckfestigkeit σ_{Pd} bestimmt wird, und die in der Praxis befriedigend bestätigt wurde.

Die umfassendsten Versuche zur Bestimmung des Elastizitätsmoduls von Beton wurden in den letzten Jahren von M. Roß (12) an der Eidgenössischen Materialprüfungs- und Versuchsanstalt Zürich angestellt. Er beanspruchte Betonprismen verschiedener Festigkeit auf Druck, und aus der gemessenen Stauchung bestimmte er den Elastizitätsmodul. Für die untersuchten Betonarten findet Roß die exakte Beziehung

$$E_t = e_{el} + \vartheta_{bl} = \frac{\sigma}{E} + \mu \frac{\sigma}{1000 \cdot (\nu \cdot \sigma_{Pd} - \sigma)} \quad (1)$$

darin bedeuten:

E_t = gesamte Formänderung (Stauchung)

e_{el} = elastische Formänderung

ϑ_{bl} = bleibende Formänderung

E = Elastizitätsmodul

σ = jeweilige Spannung

σ_{Pd} = Prismendruckfestigkeit des Betons, die allgemein etwa das 0,8-fache der Würfeldruckfestigkeit ist.

μ und ν sind Beiwerte, die von der Festigkeitsqualität des Betons abhängen. Für Beton ist $\mu \approx 0,1$ und ν wird berechnet nach

$$\nu = 1 + \frac{\sigma_{Pd}}{2200}$$

Nach der in Gleichung 1 angegebenen Schreibweise wird die gesamte Verformung in einen elastischen Teil ($e = \frac{\sigma}{E}$) und einen bleibenden oder überelastischen

$$\vartheta_{bl} = \mu \frac{\sigma}{1000 (\nu \cdot \sigma_{Pd} - \sigma)} \text{ aufgeteilt.}$$

D.h., wird ein unvorbehandelter Probekörper aus Beton einer Spannung ausgesetzt, so erleidet er eine Formänderung, die nach Ausschaltung der Spannung nicht wieder völlig verschwindet. Es ist also eine bleibende Längenänderung feststellbar. Bei wiederholten Spannungsbeanspruchungen verschwindet die bleibende Längenänderung weitgehend und der Versuchskörper zeigt die elastischen Formänderungen. Die bleibende Längenänderung, die von der Druckfestigkeit des Materials abhängig ist, wird im allgemeinen auf eine Gefügelockerung zurückzuführen sein.

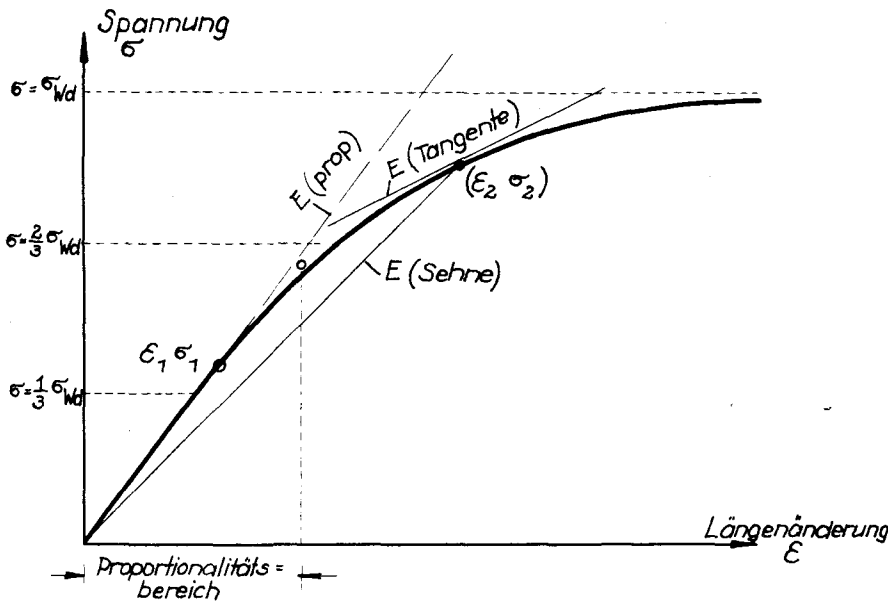


Abb. 2 Abhängigkeit der Längenänderung von der Spannung

Der gemessene Druck-Stauchungsverlauf wird durch eine Hyperbel dargestellt (s. Abb.2). Bei kleineren Spannungsbeanspruchungen bewegen sich die zugehörigen Stauchungen oder Dehnungen auf dem geraden Ast der Hyperbel, d.h. die Proportionalität zwischen Spannung und Längenänderung ist gut erfüllt. In dem Gebiet des Spannungs-Stauchungsdiagramms,

wo die Stauchung schneller wächst als die zugehörige Spannung, gilt das Hooke'sche Gesetz nicht mehr. In diesem Bereich macht sich das Korrekturglied entscheidend bemerkbar. Liegt z.B. in diesem Gebiet ein Meßpunkt $(\epsilon_2; \sigma_2)$ (s. Abb.2), so wird der zugehörige Elastizitätsmodul durch die Sehne zwischen Nullpunkt und Meßpunkt bestimmt. Der korrekte Elastizitätsmodul des entsprechenden Spannungsbereiches wird aber durch die Tangente im Meßpunkt $(\epsilon_2; \sigma_2)$ an die Hyperbel bestimmt (s. Abb. 2). Die Tangenten an die Hyperbelkurve erhält man durch Differentiation der Gleichung 1 nach σ .

$$\frac{d\epsilon}{d\sigma} = \frac{1}{E} + \mu \frac{\nu \sigma_{Pd}}{1000(\nu \sigma_{Pd} - \sigma)^2} \quad (2)$$

für $\sigma = 0$ nimmt die Tangente den Wert

$$\left(\frac{d\varepsilon}{d\sigma}\right)_{\sigma=0} = \frac{1}{E} + \frac{\mu}{1000 \sqrt{\sigma_{Pd}}} \quad (3) \quad \text{an.}$$

Bei Berücksichtigung der bleibenden Verformungen, die ebenfalls von der Festigkeit des Betons abhängen, sind diese Unterschiede bei der Bestimmung des Elastizitätsmoduls belanglos, so daß im Bereich $0 \leq \sigma \leq 0,6 \sigma_{Pd}$ mit guter Näherung das Hooke'sche Gesetz beim Beton Gültigkeit besitzt, und der aus den Messungen sich ergebende Elastizitätsmodul in diesem Bereich als charakteristische Materialkonstante gewertet werden kann.

Die von Roš angegebenen Elastizitätsmoduln aus Druckversuchen von Betonen verschiedener Festigkeit sind in der folgenden Tafel 1 zusammengestellt.

Tafel 1

Prismendruckfestigkeit kg/cm ²	stat. Elastizitätsmodul kg/cm ²	Prismendruckfestigkeit kg/cm ²	stat. Elastizitätsmodul kg/cm ²
140	2,51 · 10 ⁵	275	3,70 · 10 ⁵
170	3,25	300	3,60
180	3,28	300	3,36
200	3,00	310	3,42
230	3,00	320	3,70
230	3,10	330	3,89

Für Beton ist ebenfalls bekannt, daß der Elastizitätsmodul bei Beanspruchungswiederholungen gegenüber der jungfräulichen Belastung verschieden ist (15,16). Die gesamten Längenänderungen nehmen bei Lastwiederholungen zu. In welchem Maße diese Änderungen vor sich gehen, hängt von den elastischen Eigenschaften des Betons ab. Auch hängt die Längenänderung von der Wirkzeit der einzelnen Laststufen ab.

Das Alter, Mischungsverhältnis und auch der Wasserzusatz (Wasser-Zement-Faktor) kommen letzten Endes wieder in der Prismendruckfestigkeit zum Ausdruck, so daß die Abhängigkeit des Elastizitätsmoduls von diesen Faktoren in der Gleichung 1 unberücksichtigt bleiben kann.

Die wissenschaftlichen Erkenntnisse über den Elastizitätsmodul von Betonen, zugeschnitten auf die praktische Anwendung, sind festgelegt in DIN 1045 § 17, wonach für Beton sowohl bei Druck- als auch bei Zugbeanspruchung ein Elastizitätsmodul von $2,1 \cdot 10^5 \text{ kg/cm}^2$ anzusetzen ist. Wie aus einem Vergleich mit den Meßwerten der Tafel 1 zu ersehen ist, enthält dieser Wert einen Sicherheitsfaktor von etwa 30%.

Während den bisher bekannten Elastizitätsuntersuchungen Druckbeanspruchungen zu Grunde liegen, werden die folgenden bei einer Zugbelastung durchgeführt. Bei einem auf Zug beanspruchten Versuchskörper wird analog einer Druckbeanspruchung der gesamte Querschnitt von einer homogen über diesen verteilten Zugspannung mit überlagerten Quer- bzw. Schubkräften angegriffen. Demgegenüber ist bei Druckbeanspruchungen die Kräfteverteilung in der Zone des Versuchskörpers, die den belastenden Stempel berührt, gegenwärtig noch ungeklärt.

2.2 Versuchsanordnung für Dehnungsmessungen

2.21 Meßbedingungen und Eigenschaften der Versuchskörper

Im Rahmen der hier beschriebenen statischen Elastizitätsuntersuchungen wurde die Dehnung der Versuchskörper auf Grund von verschiedenen Zugbeanspruchungen bestimmt. Die Zugfestigkeit aller Baustoffe ist geringer als ihre Druckfestigkeit, und somit ist auch die anwendbare Zugspannung wesentlich kleiner als die Druckspannung, jedoch hat die Zugbeanspruchung den Vorzug, daß bei exakter Einspannung die einachsige oder zentrische Belastung mit geringerem Aufwand realisierbar ist. Auch wird bei dieser Belastungsart die Reibung an den Berührungsflächen Druckstempel - Versuchskörper völlig ausgeschaltet. Bei zweckmäßiger Wahl der Einspannstellen und bei ausreichender Länge der Probekörper ist bei den durchgeführten Zugversuchen eine zentrische Beanspruchung, die die Voraussetzung der Dehnungsmessungen sein muß, gegeben. Die Querschnittsabmessungen der Probekörper dürfen nicht zu gering sein, da Inhomogenitäten (Korngrößen) verschiedener Baustoffe sonst eine genaue Messung erschweren oder ausschließen würden.

Für die Versuchskörper ist zu fordern, daß die Längenänderungen allseitig gleich groß sein müssen, um damit den einachsigen Spannungszustand möglichst nahe zu verwirklichen. Bei diesen Bedingungen greift die Zugkraft im elastischen Schwerpunkt an. Der elastische Schwerpunkt fällt bei einigen untersuchten Baustoffen infolge der erwähnten unvermeidlichen Inhomogenitäten nicht mit dem geometrischen Schwerpunkt der Querschnittsfläche zusammen. Beim Beton z.B. sind die Abweichungen des elastischen vom geometrischen Schwerpunkt wegen seiner groben Körnung oft nicht unbedeutend.

Als Versuchskörper dienten prismatische Stäbe der verschiedenartigen Baustoffe von etwa 1,0 bis 1,7 m Länge und einem Querschnitt von 5 x 5 cm. Diese Probestäbe wurden entweder in der Versuchsabteilung des Instituts angefertigt oder von den Herstellerfirmen in noch zu bearbeitenden Platten oder in Stäben angeliefert.

Nach Durchführung der statischen Dehnungsmessungen wurden die schwingungstechnischen Untersuchungen vorgenommen. Am Ende dieser Untersuchungen konnte schließlich die Prismendruckfestigkeit und Biegezugfestigkeit bestimmt werden. Die benutzten Versuchskörper werden wie folgt beschrieben:

a.) Beton: Zur Herstellung wurden oben offene Holzformen entsprechender Abmessungen verwandt, deren Innenfläche mit Schalöl überstrichen war. Die Erhärtung erfolgte bei 62 - 70% Luftfeuchtigkeit und einer Raumtemperatur von 13 - 15°C. Die Ausschalung wurde 14 Tage nach der Herstellung vorgenommen. Die Zuschlagstoffe hatten eine Körnung von 0 - 15 mm, davon entfielen 30% auf 0 - 3 mm, 25% auf 3 - 7 mm und 45% auf 7 - 15 mm. Als Zement wurde ein Z 325 mit 330 kg Zement bei 1 m³ Beton verwandt.

Nach etwa 120 Tagen besaßen diese Versuchskörper folgende Eigenschaften:

Raumgewicht: $R = 2,24 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$

Feuchtigkeitsgehalt: $F = 2,7 \text{ Gew.-%}$

Prismendruckfestigkeit $\sigma_{pd} = 319,5 \text{ kg/cm}^2$

Biegezugfestigkeit: $\sigma_{bz} = 31,9 \text{ kg/cm}^2$

b.) Beton mit Bewehrung: Die Material- und Herstellungsbedingungen entsprachen den unter Absatz a.) beschriebenen. Jedoch wurde bei der Herstellung des Stabes in Längsrichtung mittig ein 0,6 cm dicker durchgehender Stahldraht eingelegt.

Nach etwa 120 Tagen besaßen diese Versuchskörper folgende Eigenschaften:

Raumgewicht: $R = 2,29 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$

Feuchtigkeitsgehalt: $F = 2,4 \text{ Gew.-%}$

Prismendruckfestigkeit: $\sigma_{pd} = 360 \text{ kg/cm}^2$

Biegezugfestigkeit: $\sigma_{bz} = 53,8 \text{ kg/cm}^2$

c.) Gips: Die Probestäbe wurden in Holzformen hergestellt, deren Innenflächen ebenfalls mit Schalöl bestrichen waren. Die aus Stuckgips ("Komet") hergestellten Versuchskörper besaßen nach etwa 140 Tagen:

Raumgewicht : $R = 1,21 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$

Feuchtigkeitsgehalt : $F = 0,5 \text{ Gew.}\%$ nach Trocknung bei 40°C

Prismendruckfestigkeit: $\sigma_{pd} = 180,5 \text{ kg/cm}^2$

Biegezugfestigkeit: $\sigma_{bz} = 30,3 \text{ kg/cm}^2$

d.) Anhydrit-Estrichmörtel: Nach Anweisung der Herstellerfirma von Anhydrit wurden 2 Rtl. Kiessand der Körnung 0 - 3 mm mit 1 Rtl. synthetischem Anhydrit trocken vermischt. Die erdfeuchte Konsistenz wird durch 25% (bezogen auf den Bindemittelgehalt) Anmachwasser, dem 2 Gew.-% des Anregers (Weißkalkhydrat) zugesetzt werden, erreicht.

Nach 120 Tagen konnten folgende Materialeigenschaften festgestellt werden:

Raumgewicht: $R = 2,12 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$

Feuchtigkeitsgehalt: $F = 8,3 \text{ Gew.-%}$

Prismendruckfestigkeit: $\sigma_{pd} = 185 \text{ kg/cm}^2$

Biegezugfestigkeit: $\sigma_{bz} = 21,9 \text{ kg/cm}^2$

e.) Hartgußasphalt: Bestehend aus 45 % Naturasphalt (Hartmastix 16%), 2,3 % Erdölbitumen, 18,0 % Splitt Körnung 3/5 mm, 18,0 % Splitt Körnung 5/8 mm, 16,7 % Sand Körnung 0/3 mm.

Die Eindringtiefe nach DIN 1996 betrug 1,2 mm.

Beim Erkaltungsvorgang des Hartgußasphaltes war besonders darauf zu achten, daß keine Blasenbildung innerhalb des Materials eintrat.

Nach 28 Tagen wurde an diesen Versuchskörpern festgestellt:

Raumgewicht: $R = 2,18 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$

Prismendruckfestigkeit: $\sigma_{pd} = 196,5 \text{ kg/cm}^2$

Biegezugfestigkeit: $\sigma_{bz} = 50,1 \text{ kg/cm}^2$

f.) Gußasphalt ("Avola"): Diese Asphalt-Art ist weicher als die unter e.) beschriebene, die Eindrucktiefe betrug 2,3 mm. Die Zusammensetzung beträgt: 16% Bitumen und 84% Mineralmasse bestehend aus den Körnungen: 0,1% 3/5 mm, 8,1 % 1/3 mm; 25% 0,6/1 mm; 17,4% 0,2/0,6 mm; 49,4% < 0,2 mm.

Nach 28 Tagen errechnet sich ein Raumgewicht von $R = 1,90 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$. Eine Prismendruck- und eine Biegezugfestigkeit ist bei diesem plastischen Material nicht definierbar.

g.) Luftgehärteter Porenbeton für Estriche ("Porozell")

Dieser Baustoff wird unter der Firmenbezeichnung "Porozell" hergestellt. Das erdfeuchte Material wurde in den erwähnten Holzformen mit Schalungsöl an einer Baustelle entnommen. Die Abbindung erfolgte unter den in Abs. a.) angegebenen klimatischen Bedingungen an der Luft. Angaben über Bindemittel und Zuschlagstoffe liegen nicht vor.

Die folgenden Angaben beziehen sich auf ein Herstellungsalter von etwa 120 Tagen:

Raumgewicht: $R = 1,22 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$

Feuchtigkeitsgehalt: $F = 3,5 \text{ Gew.-%}$

Prismendruckfestigkeit: $\sigma_{pd} = 29,2 \text{ kg/cm}^2$

Biegezugfestigkeit: $\sigma_{bz} = 9,4 \text{ kg/cm}^2$

h.) Ziegelkörper: Die Versuchskörper wurden in den oben angegebenen Abmessungen von den Heisterholzer Klinkerwerken hergestellt. Die Probestücke sind folgenden Brenntemperaturen unterzogen worden.

Stab I : 1020°C	Kurzbezeichnung: Ziegel 1020
Stab II : 1100°C	Kurzbezeichnung: Ziegel 1100
Stab III : 1160°C	Kurzbezeichnung: Ziegel 1160
Stab IV : 1200°C	Kurzbezeichnung: Ziegel 1200

Für diese Stäbe konnten die folgend genannten Materialeigenschaften bestimmt werden:

	Raumgewicht kg/m ³	Feuchtigkeitsgehalt Gew.-%	Prismendruckfestigkeit kg/cm ²	Biegezugfestigkeit kg/cm ²
Ziegel 1020	1,91 · 10 ³	0,6	606	320
Ziegel 1100	2,04 · 10 ³	0,4	775	319
Ziegel 1160	2,07 · 10 ³	0,2	910	318
Ziegel 1200	2,10 · 10 ³	0,2	1078	323

i.) Kalksandstein (normal): Diese Versuchskörper wurden in den genannten Abmessungen von dem Kalksandsteinwerk P. Wüseke, Sennelager, hergestellt. Zur Zeit der Messungen betrugen:

Raumgewicht: $R = 1,28 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ *)

Feuchtigkeitsgehalt: $F = 5,9 \text{ Gew.-%}$

Prismendruckfestigkeit $\sigma_{Pd} = 314 \text{ kg/cm}^2$

Biegezugfestigkeit $\sigma_{bz} = 30,0 \text{ kg/cm}^2$

k.) Kalksand-Leichtstein: Die Herstellung dieser Versuchskörper erfolgte ebenfalls in dem Kalksandsteinwerk P. Wüseke. Die Versuchskörper besaßen folgende Eigenschaften:

Raumgewicht: $R = 0,85 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$

Feuchtigkeitsgehalt: $F = 5,6 \text{ Gew.-%}$

Prismendruckfestigkeit $\sigma_{Pd} = 17,3 \text{ kg/cm}^2$

Biegezugfestigkeit $\sigma_{bz} = 5,7 \text{ kg/cm}^2$

l.) Dampfgehärteter Porenbeton ("Ytong"): Die Firma Steine und Erden stellte für die Versuche 5 cm dicke Dachplatten zur Verfügung, aus denen die benötigten Probekörper angefertigt werden konnten.

*) Im Gegensatz zu den üblichen Kalksandsteinen besitzen diese Versuchskörper ein geringeres Raumgewicht, da es sich um Sonderanfertigungen handelt.

Raumgewicht: $R = 0,59 \text{ kg/m}^3$

Feuchtigkeitsgehalt: $F = 7,0 \text{ Gew.-%}$

Prismendruckfestigkeit: $\sigma_{pd} = 34,8 \text{ kg/cm}^2$

Biegezugfestigkeit: $\sigma_{bz} = 10,8 \text{ kg/cm}^2$

m.) Dampfgehärteter Porenbeton ("Ytong") mit Mörtelschicht



Auf die soeben genannten Probekörper wurde einseitig eine 1,5 cm dicke Mörtelschicht (1:2:8) aufgetragen (Skizze). Dieser Probekörper zeigte nach etwa 120 Tagen folgende Eigenschaften:

Raumgewicht: $R = 1,09 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$

Feuchtigkeitsgehalt: $F = 5,1 \text{ Gew.-%}$

Prismendruckfestigkeit: $\sigma_{pd} = 47,7 \text{ kg/cm}^2$

Biegezugfestigkeit: $\sigma_{bz} = 16,2 \text{ kg/cm}^2$

n.) Dampfgehärteter Porenbeton ("Siporex"): Die Firma Siporex A.G., Hamburg lieferte das Material in Platten von 5 cm Dicke an, aus denen die erforderlichen Versuchskörper angefertigt werden konnten. Dieses Material wurde in unterschiedlicher Festigkeit und Dichte untersucht (Kurzbezeichnung entsprechend dem Raumgewicht) und hatte folgende Eigenschaften zur Zeit der Messungen:

Siporex R 500

Raumgewicht: $R = 0,48 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$

Feuchtigkeitsgehalt: $F = 6,7 \text{ Gew.-%}$

Prismendruckfestigkeit: $\sigma_{pd} = 18,2 \text{ kg/cm}^2$

Biegezugfestigkeit: $\sigma_{bz} = 4,4 \text{ kg/cm}^2$

Siporex R 700

Raumgewicht: $R = 0,68 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$

Prismendruckfestigkeit: $\sigma_{pd} = 35,0 \text{ kg/cm}^2$

Biegezugfestigkeit: $\sigma_{bz} = 5,8 \text{ kg/cm}^2$

o.) Eichenholz: Diese Versuchskörper sind mit handelsüblichen Eigenschaften von einer Fachhandlung bezogen.

Raumgewicht: $R = 0,60 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$; Feuchtigkeitsgehalt: $F = 13,2 \text{ Gew.-%}$.

p.) Fichtenholz: Die Eigenschaften dieser Körper entsprachen ebenfalls den normalen astlosen Hölzern.
Raumgewicht: $R = 0,43 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$; Feuchtigkeitsgehalt: $F = 11,6 \text{ Gew.-%}$

q.) Steinholz: Die Probestäbe wurden mit unterschiedlichen Mischungsverhältnissen nach DIN 272 u. 273 vom Institut für Steinholzforschung, Bonn, hergestellt. Während für die Stäbe I bis III ein Mischungsverhältnis entsprechend der Verwendung als Nutzschrift gewählt wurde, ist das Material des Stabes IV für Estriche bzw. Unterböden vorgesehen.

Nachfolgend sind die Zusammensetzung in Raumteilen und die Eigenschaften der Prüfkörper zur Zeit der Messungen angegeben:

Mischung I :

Magnesit	1462 Rtl.	Holzmehl	1406 Rtl.
Quarzmehl	506 Rtl.	Talkum	84 Rtl.
Asbest	506 Rtl.	Lauge	1500 Rtl. (22°Bé)

Zusätzlich enthielt die Mischung 126g Farbpigment.

Eigenschaften:

Raumgewicht: $R = 1,0 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$
Feuchtigkeitsgehalt: $F = 16,3 \text{ Gew.-%}$
Prismendruckfestigkeit $\sigma_{pd} = 342 \text{ kg/cm}^2$
Biegezugfestigkeit $\sigma_{bz} = 117 \text{ kg/cm}^2$

Mischung II

Magnesit	975 Rtl.	Lauge (22°Bé)	1000 Rtl.
Holzmehl	1671 Rtl.		

Die Mischung enthielt ferner 84 g Farbpigment.

Eigenschaften:

Raumgewicht: $R = 1,3 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$
Feuchtigkeitsgehalt: $F = 12,9 \text{ Gew.-%}$
Prismendruckfestigkeit $\sigma_{pd} = 199 \text{ kg/cm}^2$
Biegezugfestigkeit $\sigma_{bz} = 113 \text{ kg/cm}^2$

Mischung III

Magnesit	1200 Rtl.	Holzmehl	1020 Rtl.
Quarzmehl	600 Rtl.	Lauge	936 Rtl. (31°Bé)
Trass	480 Rtl.		

Eigenschaften:

Raumgewicht : $R = 1,4 \cdot 10^3 \text{ kg/cm}^3$
Feuchtigkeitsgehalt : $F = 12,5 \text{ Gew.-%}$
Prismendruckfestigkeit : $\sigma_{Pd} = 443 \text{ kg/cm}^2$
Biegezugfestigkeit: $\sigma_{bz} = 112 \text{ kg/cm}^2$

Mischung IV

Magnesit	500 Rtl.	Holzspäne	1500 Rtl.
Sand	450 Rtl. (< 3 mm)	Lauge	800 Rtl. (18°Bé)
Trass	50 Rtl.		

Eigenschaften:

Raumgewicht : $R = 1,0 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$
Feuchtigkeitsgehalt $F = 13,8 \text{ Gew.-%}$
Prismendruckfestigkeit $\sigma_{Pd} = 107 \text{ kg/cm}^2$
Biegezugfestigkeit $\sigma_{bz} = 51 \text{ kg/cm}^2$

2.22 Dehnungsmeßeinrichtung

Für die Dehnungsmessungen wurden die Versuchskörper am oberen und unteren Ende in mit Zähnen versehenen Klauen eingespannt. Die Klauen waren als Metallbacken hergestellt, die etwa 10 cm auf den vier Seiten der Versuchskörper auflagen und mit Schrauben fest gegen diese gezogen wurden. Die obere Spannklaue war mittig fest mit dem Doppel-T-Träger eines Portalkrahnes verbunden, während die untere ebenfalls mittig mit dem belastenden Hebelarm (s. Abb. 3) verbunden war. Das Übertragungsverhältnis von aufgebrachtener zu an dem Stabe angreifender Last betrug 1 : 5,14 (s. Abb. 3). Diese Versuchsvorrichtung hat gegenüber hydraulischen Zugvorrichtungen den Vorzug, daß auch bei kleineren Belastungen keine durch Trägheit der Anzeiginstrumente verursachte Ungenauigkeit auftreten kann.

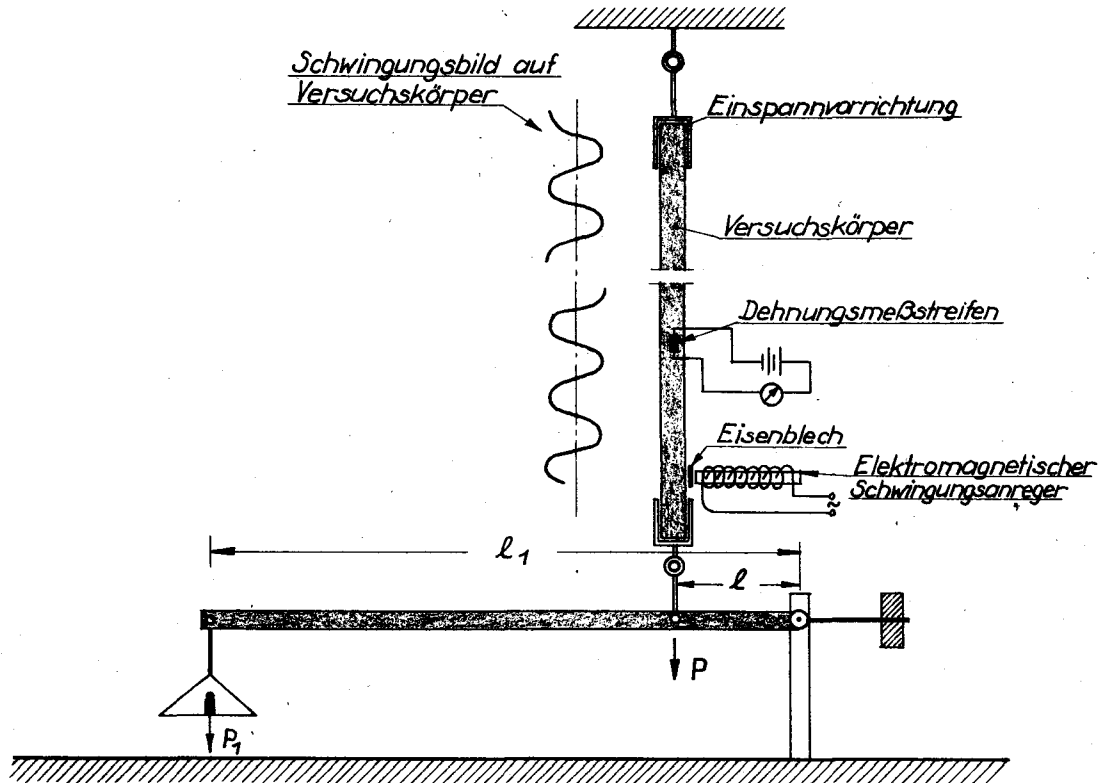


Abb. 3 Prinzipskizze der Dehnungsmeßeinrichtung

Zur Bestimmung der Längenänderung bei Zugbelastung wurde etwa in der Mitte der Versuchskörper an zwei gegenüberliegenden Seiten je ein Dehnungsmeßstreifen angeklebt. Diese Meßstreifen sind fest mit dem Versuchskörper verbunden und setzen der Formänderung einen vernachlässigbaren mechanischen Widerstand entgegen. Die Dehnungen in den Meßstreifen verursachen Änderungen des elektrischen Widerstandes, die mit Hilfe der benutzten Dehnungsmeßbrücken als Längenänderungen in ‰ ablesbar sind. Bei diesen Messungen ist zu fordern, daß der Einfluß der Temperatur auf den elektrischen Widerstand der Meßstreifen aufgehoben wird. Dieses geschieht durch Kompensationsstreifen, die an einem unbelasteten Versuchskörper gleicher Temperatur und des gleichen Materials angebracht werden. Die Ablesegenauigkeit bei dieser Meßvorrichtung beträgt im empfindlichsten Bereich etwa $\pm 10^{-3} \text{‰}$ Längenänderung.

2.23 Versuchsdurchführung

Da die elastischen Eigenschaften der Baustoffe im allgemeinen eine gewisse Abhängigkeit vom Alter des Materials zeigen, wurde angestrebt, die Dehnungsmessungen nach einer Abbindezeit von 28 - 30 Tagen durchzuführen. Während dieser Abbindezeit wurden die Baustoffe in einem geschlossenen Raum mit einer Raumtemperatur von $10 - 14^{\circ}\text{C}$ und einer rel. Luftfeuchtigkeit von 62 bis 70% gelagert. Bei diesen klimatischen Bedingungen erfolgten auch die Dehnungsmessungen.

Vor Beginn der eigentlichen Dehnungsmessungen hingen sämtliche Versuchskörper mit der Vorlast ihres Eigengewichtes etwa 4 - 5 Stunden senkrecht in der Meßanordnung, um eine Nullpunktverschiebung auszuschließen. Sodann wurde die Belastung stufenweise und zwar zunächst in zunehmender sodann in abnehmender Form angelegt. Die gewählten Belastungsschritte schwankten von Probekörper zu Probekörper, da auch deren Zugfestigkeiten sich erheblich unterschieden. Bei den meisten untersuchten Baustoffen konnte jedoch die obere Grenze der für Beton gültigen Linearität zwischen Spannung und Dehnung, nämlich $\sigma = 0,6 \sigma_{\text{Pd}}$, nicht angenähert werden, da die Festigkeit der Versuchskörper infolge des relativ hohen Druckes an den Einspannstellen geringer war, als der normalen Zugfestigkeit entsprechen würde. Durch Verstärkung der Einspannstellen hätten die Zugspannungen erhöht werden können. Aber dadurch wäre einmal eine einachsige Zugbelastung erschwert worden, und zum anderen sollten die Versuchskörper gleichzeitig für dynamische Untersuchungen angewandt werden, die Verdickungen an den Enden ausschließen.

Wie bei den Messungen festgestellt werden konnte, hat die Größe der Belastungsstufen innerhalb des gewählten Spannungsbereiches bei sämtlichen Versuchskörpern keinen Einfluß auf die Dehnungs-Proportionalität. Bei Baustoffen mit vorwiegend lockerem Gefüge, wie bei den Leichtbetonen, ist die Wirkzeit der Belastung auf die Dehnung des Stabes von Bedeutung, was auf ein beginnendes plastisches Fließen des entsprechenden Stoffes schließen läßt. Der Unterschied der Dehnung bei einer Wirkzeit der Belastung bis zu 1 min ist noch vernachlässigbar. Daher wurde für jede Laststufe eine Wirkzeit der Spannung von etwa 30 sec gewählt.

Vor der Durchführung jeder Dehnungsmessung wurde die Längenänderung bei geringeren Belastungen an zwei gegenüberliegenden Seiten der Versuchskörper bestimmt. Falls diese Längenänderungen sich als gleich groß ergaben, so war der einachsige Spannungszustand weitmöglichst angenähert.

Bei der Bestimmung der Längenänderung war besonders darauf zu achten, daß die Dehnungsmeßstreifen eine einwandfreie Verbindung mit den Versuchskörpern hatten, und daß sowohl der Meßstreifen als auch der Kompensationsstreifen während der Untersuchungen konstante Temperaturen aufwiesen. Bei Versuchskörpern mit örtlichen Inhomogenitäten, wie z.B. Beton, hat es sich als zweckmäßig erwiesen, mehrere Dehnungsmeßstreifen auf diesem anzubringen, um somit zufällige Abweichungen der Längenänderungen, die durch die Größe der Meßstreifen (ca. 2 cm^2) gegeben sind, auszuschalten.

Bei der Durchführung der Versuche mußte bei der Auftragung der Dehnung in Abhängigkeit von der Spannung zwischen dem Be- und Entlastungsast unterschieden werden. Beide Äste bilden die Hysteresisschleife, deren Flächeninhalt nach Ban (15) ein Maß für die Ermüdungserscheinungen des jeweiligen Baustoffes ist. Die Differenz zwischen dem Be- und Entlastungsast bei der Spannung $\sigma = 0$ ist gleichzeitig die bleibende Längenänderung, die bei wiederholten Belastungen der Baustoffe abnimmt und schließlich Null wird.

Das Spannungs-Dehnungsdiagramm des ersten Belastungsfalles ist somit als Ursprungselastizität der Versuchskörper anzusehen. Zur Bestimmung dieser Ursprungselastizität wird im allgemeinen die Steigung des Entlastungsastes herangezogen. Im Rahmen der folgenden Untersuchungen interessierten weder die Ermüdungserscheinungen noch die ursprünglichen Elastizitätswerte. Dagegen wurde der Schwerpunkt auf den Beharrungs- bzw. Gleichgewichtszustand der Versuchskörper gelegt, der nach wiederholter Belastung erreicht wird. Dieser Gleichgewichtszustand ist dann erreicht, wenn der Be- und Entlastungsast zusammenfallen.

Die erste Be- und Entlastungsfolge, die jeweils in Laststufen erfolgte, soll als Belastungsfall I bezeichnet werden. Eine entsprechende Bezeichnung tragen die folgenden Belastungs-

fälle, die jeweils in einem zeitlichen Abstand von etwa 30 Minuten durchgeführt wurden.

Vor Beginn der Dehnungsuntersuchungen war es zur Erzielung exakter Meßergebnisse erforderlich, das Dehnungsmeßgerät bezüglich seiner Meßgenauigkeit zu überprüfen. Dazu wurden E-Modul-Vergleichsmessungen mit dem Martens'schen Spiegelgerät (Wöhler-Institut T.H. Braunschweig) nach DIN 50 107 und der beschriebenen Dehnungsmeßbrücke an Schmiedeeisen gleicher Eigenschaften durchgeführt. Die Vergleichsmessungen lieferten folgende Werte:

Martens'sches Spiegelgerät: $E = 2,09 \cdot 10^6 \text{ kg/cm}^2$
Dehnungsmeßbrücke : $E = 2,05 \cdot 10^6 \text{ kg/cm}^2$

Damit ergeben sich Abweichungen von etwa 2%. Diese Meßgenauigkeit kann für die folgenden Untersuchungen als ausreichend bezeichnet werden.

2.3 Meßergebnisse

Bei der Bestimmung des statischen Elastizitäts-Moduls diente die Beziehung $\sigma = E \cdot \epsilon$ als Ausgangsgleichung. Zu verschiedenen Zugspannungen σ wurden die zugehörigen Dehnungen ϵ der Versuchskörper bestimmt.

Das Steigungsmaß der geradlinigen Verbindung der Meßpunkte im Spannungs-Dehnungsdiagramm ist zugleich der Elastizitätsmodul.

Das Spannungs-Dehnungsdiagramm ist sowohl für Beton als auch für Porenbeton, zwei Versuchskörper mit extremer Gefügeporosität, in der Abb. 4 dargestellt.

Abb. 4

s. Seite 24

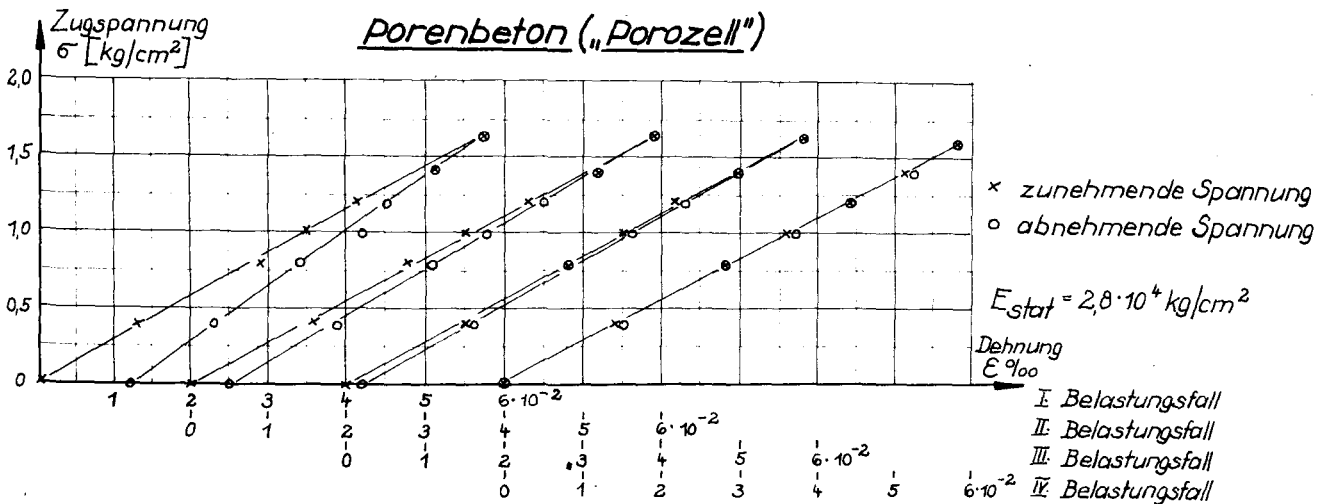
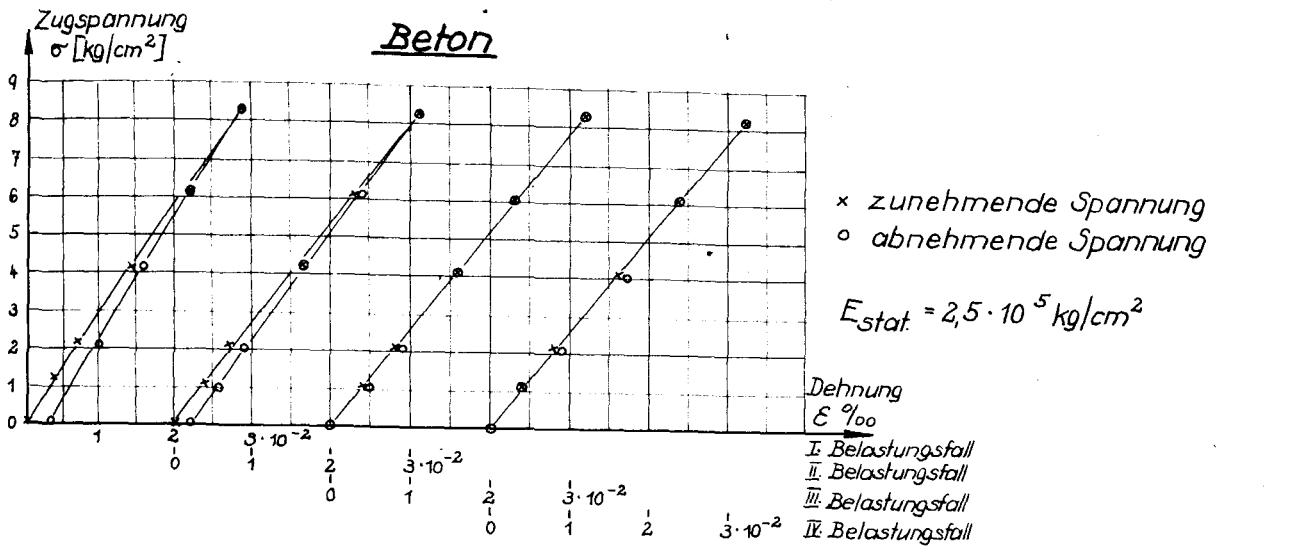


Abb. 4 Spannungs-Dehnungsdiagramm für Beton und Porenbeton („Porozell“)

Aus dieser Gegenüberstellung ist zunächst ganz grob zu folgern, daß beim ersten Belastungsfall die Dehnungen gleicher Spannungswerte bei zunehmender und abnehmender Spannung unterschiedlich groß sind. Mit wachsender Anzahl der Belastungswiederholung werden diese Differenzen geringer und verschwinden schließlich. Durch die Größenänderungen der angreifenden Kraft bei einer Be- und Entlastung tritt nach mehreren Belastungsfällen ein Gleichgewichtszustand in der möglichen Verschiebung der Stoffteilchen ein, und somit werden bei einer Be- und Entlastung die gleichen Längenänderungen erhalten. Diese Längenänderungen werden sich

auch nicht ändern, solange die maximal angelegte Zugspannung bei weiteren Belastungsfällen nicht überschritten wird. Innerhalb des angegebenen Spannungsbereiches ist daher der Elastizitätsmodul als eine Stoffkonstante anzusehen.

Weiter ist aus dem angeführten Beispiel zu folgern, daß die Differenz der Längenänderungen, die bei der Zugspannung

$\epsilon = 0$ mit der bleibenden Längenänderung identisch ist, für die ersten Belastungsfälle von den Festigkeitseigenschaften der Baustoffart abhängig ist. Wie die Abb. 4 zeigt, ist der absolute Wert der bleibenden Längenänderung bei Baustoffen mit lockerer Gefügestruktur (Porenbeton) größer, als bei denen mit fester Struktur (Beton). Auch wird der erwähnte Gleichgewichtszustand für die Verschiebung der Massenteilchen vom Beton schneller erreicht als vom Porenbeton.

Die in der folgenden Tafel 2 angegebenen statischen Elastizitätsmoduln der untersuchten Baustoffe gelten jeweils für diesen Gleichgewichtszustand, der stets erst nach mehreren Belastungsfällen erreicht wurde, und der Natur der angewandten Zugbelastung entsprechend für den unteren Spannungsbereich.

T a f e l 2

Nr.	Baustoff	stat.E-Modul in kg/cm ²	Nr.	Baustoff	stat.E-Modul in kg/cm ²
a	Beton	$2,5 \cdot 10^5$	i	Kalksandstein	$7,5 \cdot 10^4$
b	Beton m. Bewehrung	$2,8 \cdot 10^5$	k	Kalksand- Leichtstein	$3,4 \cdot 10^4$
c	Gips	$6,0 \cdot 10^4$	l	Dampfgeh. Porenbeton ("Ytong")	$3,0 \cdot 10^4$
d	Anhydrit	$1,4 \cdot 10^5$	m	Dampfgeh.Poren- beton ("Ytong") m.Mörtelschicht	-
e	Hartguß- asphalt	$6,3 \cdot 10^4$	n	Dampfgeh.Poren- beton("Siporex") R 500	$7,9 \cdot 10^3$
f	Gußasphalt ("Avola")	-		R 700	$1,4 \cdot 10^4$
g	Luftgeh. Porenbeton ("Porozell")	$2,8 \cdot 10^4$	o	Eichenholz	$5,8 \cdot 10^4$
h	Ziegelkörper		p	Fichtenholz	$7,2 \cdot 10^4$
	Ziegel 1020	$1,8 \cdot 10^5$	q	Steinholz	nicht geprüft
	Ziegel 1100	$2,0 \cdot 10^5$			
	Ziegel 1160	$2,4 \cdot 10^5$			
	Ziegel 1200	$2,9 \cdot 10^5$			

Die angegebenen Elastizitätsmoduln sind für die genannten Baustoffe ohne jegliche vorherige äußere Beanspruchung und unter gleichen Voraussetzungen gewonnen. Aus räumlichen Gründen muß auf die Aufzeichnung der einzelnen Spannungs-Dehnungsdiagramme verzichtet werden.

2.4 Bemerkenswerte Randerscheinungen

2.41 Einfluß von Schwingungen und Feuchtigkeit auf den statischen Elastizitätsmodul

Da die Baustoffe in der Praxis den verschiedenartigsten äußeren Einflüssen ausgesetzt sind, sollten unter labormäßigen Bedingungen diese äußeren Einflüsse nachgebildet werden, und die Abhängigkeit des Elastizitätsmoduls dann festgelegt werden. Daher erschien es lohnend, den Elastizitätsmodul nach verschiedenartigen Vorbehandlungen der Versuchskörper zu bestimmen. Sehr naheliegend war die Verfolgung der Frage, wie sich äußerlich erzwungene Schwingungen (Erschütterungen) der Versuchskörper auf den statischen Elastizitätsmodul auswirken. Die Versuche wurden an dampfgehärtetem Porenbeton ("Ytong") durchgeführt.

An einem Versuchskörper erfolgten zunächst statische Längenänderungsmessungen. Sodann wurde derselbe Körper in seinen Eigenfrequenzen etwa jeweils 1/2 Stunde zu Schwingungen angeregt. (s. Abb. 3). Im Anschluß an die Schwingungsbeanspruchung wurden in zeitlichen Abständen wieder statische Dehnungsmessungen durchgeführt. Die vor und nach dieser Beanspruchung gewonnenen Ergebnisse sind in der folgenden Abb. 5 angegeben.

Abb. 5

s. folg. Seite

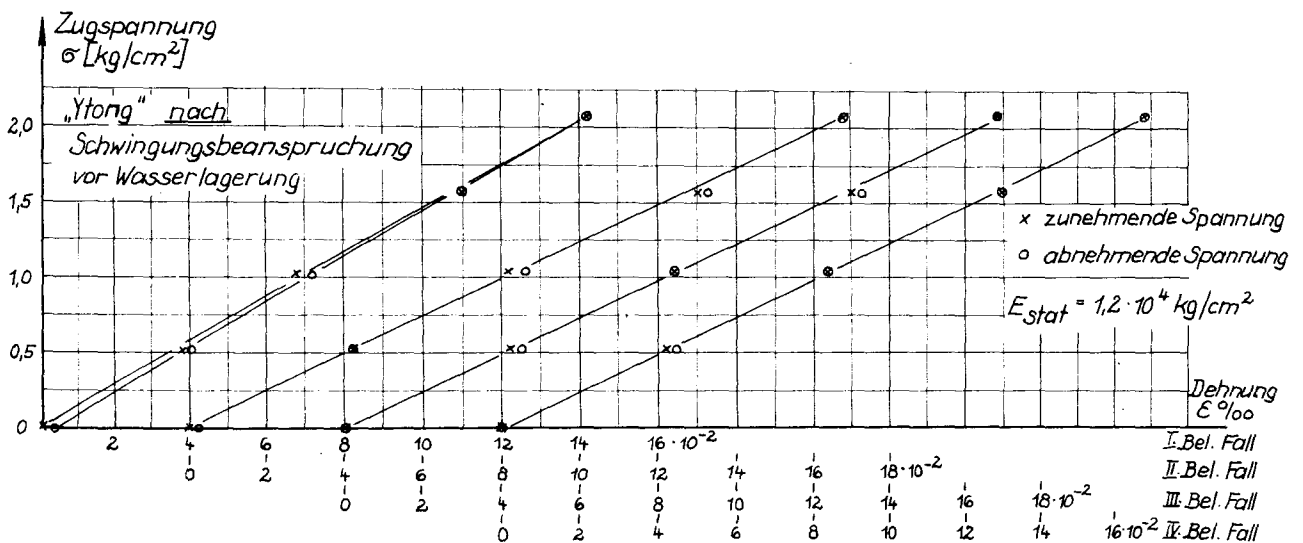
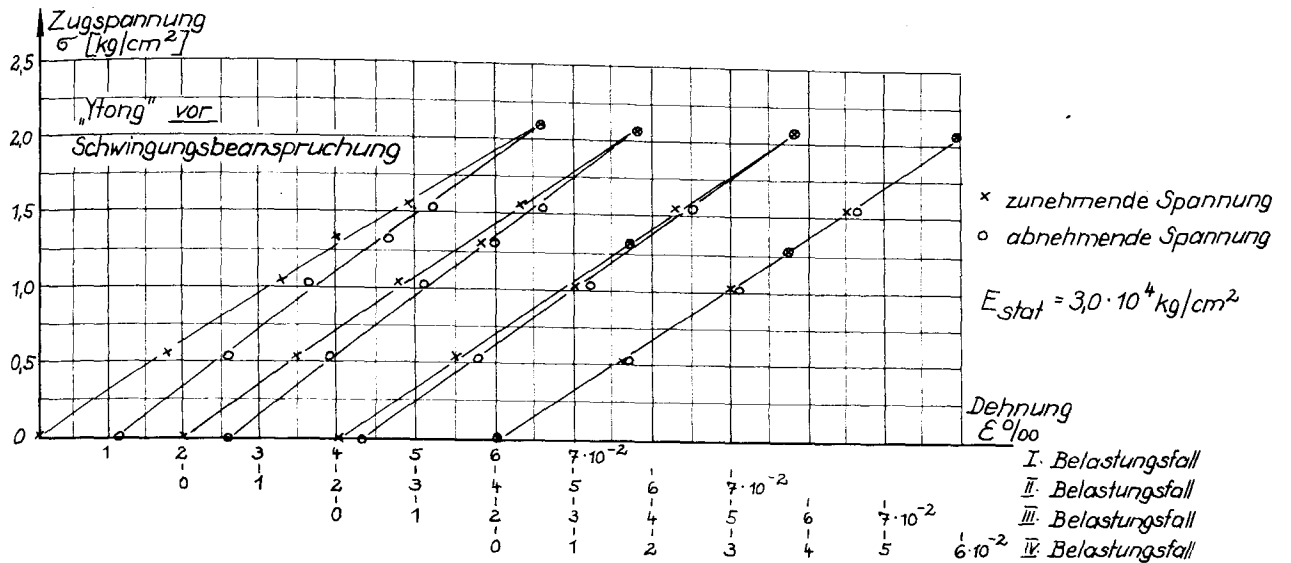


Abb. 5 Spannungs-Dehnungsdiagramm für Porenbeton("Ytong")

Aus dieser Darstellung der Meßergebnisse ist zu entnehmen, daß durch die Schwingungsanregung der stat. Elastizitätsmodul herabgesetzt wird. Für den geprüften dampfgehärteten Porenbeton ("Ytong") konnte erhalten werden:

vor Schwingungsanregung : $E_{stat} = 3,0 \cdot 10^4 \text{ kg/cm}^2$
nach Schwingungsanregung : $E_{stat} = 1,2 \cdot 10^4 \text{ kg/cm}^2$.

Diese Unterschiede des stat. Elastizitätsmoduls konnten durch drei Meßreihen bestätigt werden.

Im unvorbehandelten Zustand sind die Masseteilchen des Porenbetons zunächst dicht und starr nebeneinander gepackt. Wird

der Versuchskörper einer einachsigen Kraft ausgesetzt, so tritt eine gewisse Lockerung der einzelnen Stoffteilchen in dieser Richtung ein. Durch die Schwingungsanregung wirken auf die Stoffteilchen periodische Wechselkräfte, vor allem in der zur Stabachse senkrechten Richtung, so daß eine weitere Lockerung des Gefüges eintritt. Bei konstanter Kraftwirkung werden die Längenänderungen dann entsprechend größer. Wie groß der Einfluß periodischer Wechselkräfte bei Baustoffen mit größerem inneren Zusammenhalt wie z.B. beim Beton ist, wird unter 2.42 besprochen.

Neben der Erschütterungsbeanspruchung werden die Baustoffe in der Praxis vorwiegend noch der Feuchtigkeit ausgesetzt. Daher wurden im Anschluß an die Dehnungsmessungen und die Schwingungsbeanspruchung die Versuchskörper aus Porenbeton ("Ytong") 24 Stunden in Wasser gelagert. Nach dieser Zeit hatten sie ca. 53 Gew.-% Feuchtigkeit aufgenommen. Die Austrocknung der Versuchskörper wurde darauf bei 13 - 15°C solange fortgesetzt, bis sie ihren ursprünglichen Feuchtigkeitsgehalt von ca. 7 Gew.-% wieder erreicht hatten. Nach Austrocknung wurden die Dehnungsmessungen wiederholt. Das Ergebnis dieser Messungen ist in der folgenden Abb. 6 angegeben. Als Vergleich ist die Abb. 5 heranzuziehen.

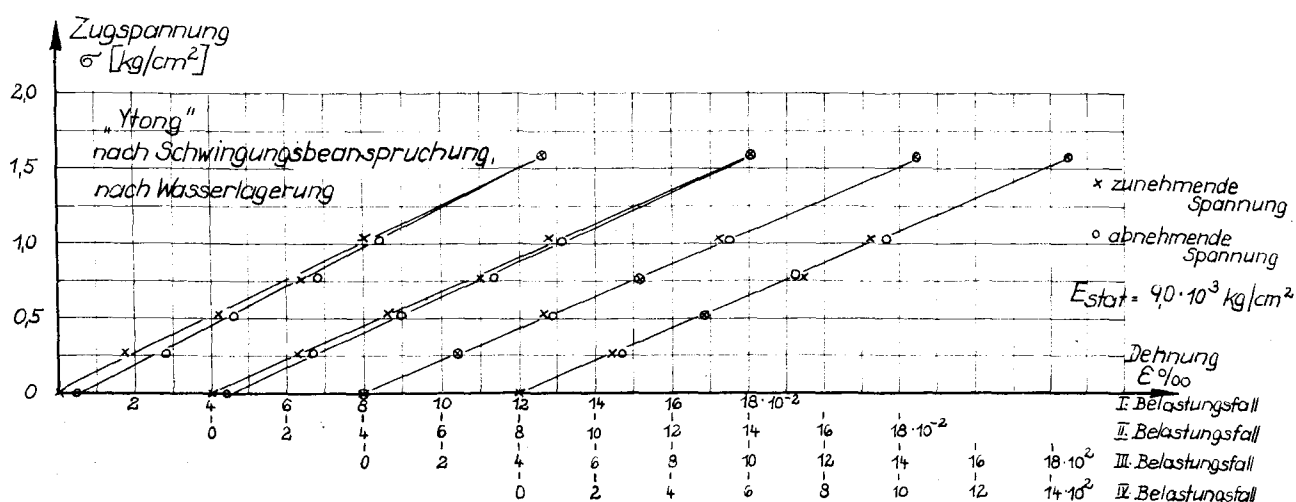


Abb. 6 Spannungs-Dehnungsdiagramm für Porenbeton ("Ytong") nach Wasserlagerung und anschließender Austrocknung

Aus den Aufzeichnungen ergeben sich für den statischen Elastizitätsmodul des Porenbetons ("Ytong") folgende Werte:

vor Wasserlagerung: $E_{\text{stat}} = 1,2 \cdot 10^4 \text{ kg/cm}^2$

nach Wasserlagerung: $E_{\text{stat}} = 0,9 \cdot 10^4 \text{ kg/cm}^2$

Durch die verschiedenen äußeren Einflüsse und Vorbehandlungen des Porenbetons, kann sein statischer Elastizitätsmodul etwa um den Faktor 3 herabgesetzt werden. Im Vergleich zu gut definierbaren Stoffen ist dieser Bereich relativ groß.

Das Absinken des Elastizitätsmoduls von Porenbeton nach einer Wasserlagerung läßt sich durch Abschwemmung oder Auflösung von Stoffteilchen oder Bindemitteln erklären. Diese Vermutung wird gestützt durch das unterschiedliche Trockenraumgewicht des Porenbetons. Dieses wurde bestimmt:

vor Wasserlagerung: $R = 608 \text{ kg/m}^3$

nach Wasserlagerung: $R = 586 \text{ kg/m}^3$.

2.42 Temperaturabhängigkeit des statischen Elastizitätsmoduls

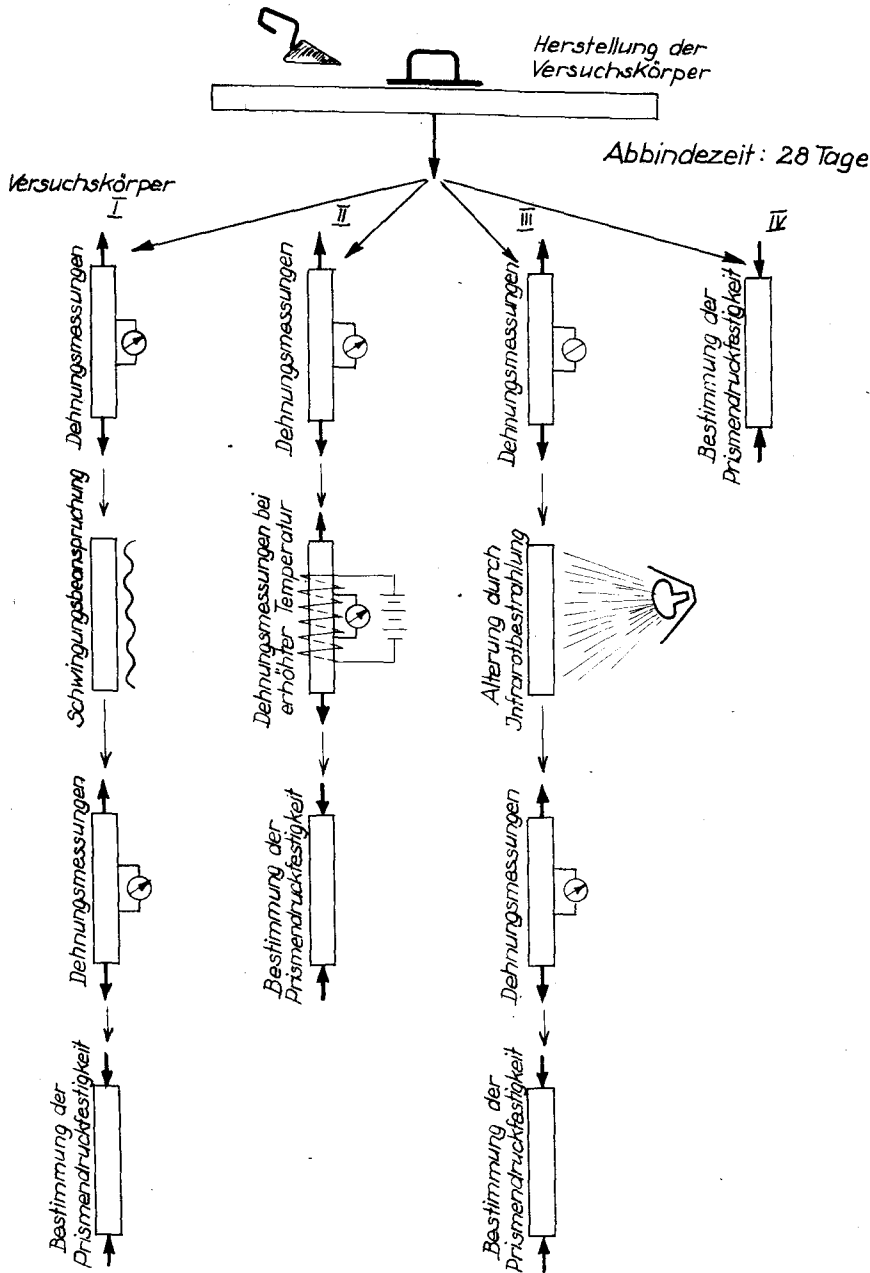
Da für Porenbeton eine Abhängigkeit der Längenänderung von der Vorbehandlung festgestellt werden konnte, sollten entsprechende Untersuchungen auch auf Beton ausgedehnt werden. Außerdem sollten Alterungs- oder Temperatureinflüsse an Betonkörpern festgestellt werden. Daher wurden an vier unter gleichen Bedingungen hergestellten und gelagerten Versuchskörpern die in der Abb. 7 im Prinzip dargestellten Untersuchungen durchgeführt.

Versuchskörper I:

Nach einer Abbindezeit von 28 Tagen wurden an diesem Prüfkörper Dehnungsmessungen durchgeführt. Anschließend wurde der Stab in seinen Eigenfrequenzen zu Biegeschwingungen angeregt und sodann erfolgten weitere Dehnungsmessungen. Den Abschluß dieser Versuchsreihe bildete die Bestimmung der Prismen-druckfestigkeit.

Versuchskörper II:

Nach den anfänglichen Dehnungsmessungen bei Raumtemperatur wurden entsprechende Dehnungsmessungen bei etwa 100°C durch-



geführt. Mit Hilfe einer elektrischen Widerstandsheizung konnte diese Temperatur des Versuchskörpers hergestellt werden. (s. Abb. 8). Nach einer langsamen Anheizzeit wurde die Endtemperatur etwa 3 Stunden konstant gehalten, bevor die Dehnungsmessungen erfolgten. Damit sollte in der Umgebung der Dehnungsmeßstelle ein Temperaturgleichgewicht erreicht werden.

Abb. 7 Versuchsfolge an Prüfkörpern aus Beton

Versuchskörper III:

Nach den Formänderungsuntersuchungen wurde dieser Versuchskörper einer Infrarotbestrahlung ausgesetzt. Auf der gesamten Länge des Stabes waren drei Strahler in etwa 30 cm Abstand vom Versuchskörper angebracht. Die Strahlungseinwirkung betrug 24 Stunden. Anschließend wurden an dem Versuchskörper weitere Dehnungsmessungen und schließlich die Bestimmung der Prismendruckfestigkeit vorgenommen.

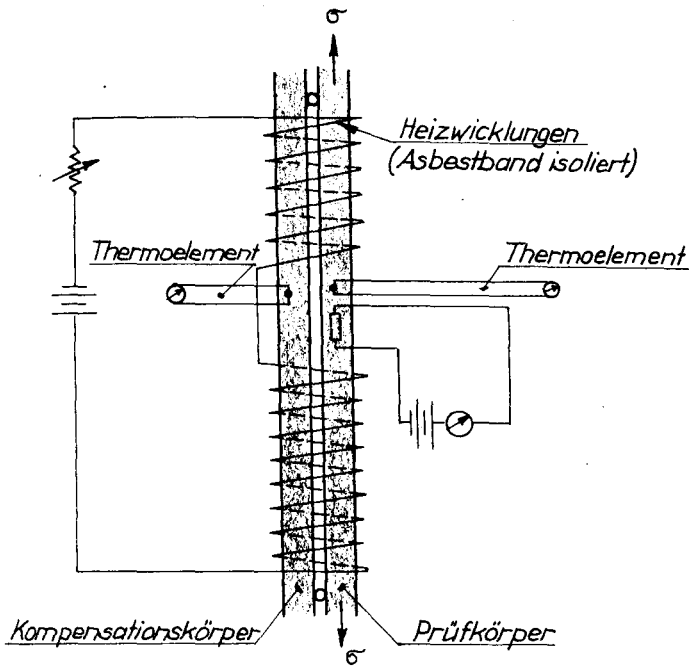


Abb. 8 Messung der Dehnung bei höheren Temperaturen

Versuchskörper IV:

An diesem Stab wurde lediglich die Prismendruckfestigkeit bestimmt. Da der Einfluß aufeinanderfolgender Belastungen bereits untersucht wurde (s. Abb. 4) ist im folgenden bei der Angabe der Längenänderungen in Abhängigkeit von der Spannung nur der Endzustand angegeben, bei dem bereits Gleichheit zwischen gesamt und federnder Längenänderung besteht. Die für die beschriebenen Versuchskörper gewonnenen Spannungs-Dehnungsdiagramme sind in der folgenden Abb. 9 wiedergegeben.

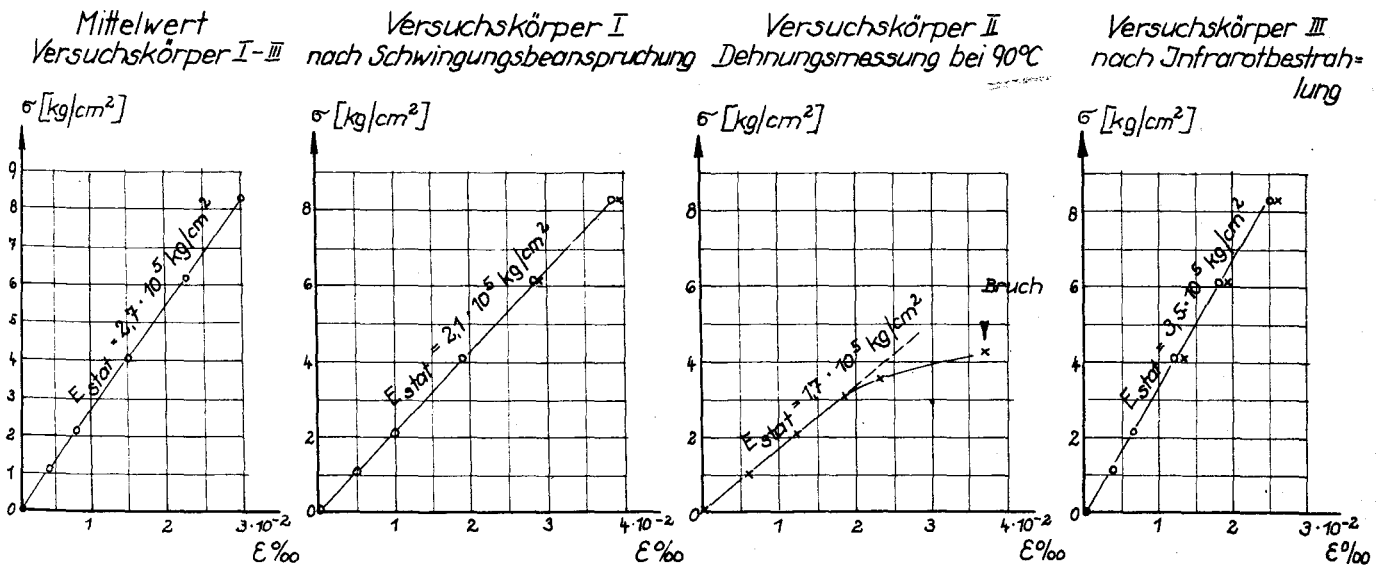


Abb. 9 Spannungsdehnungsdiagramm der verschiedenen Beton-Versuchskörper.

Für die unbehandelten Versuchskörper wurde nur der Mittelwert der Dehnungen in Abhängigkeit von der Spannung angegeben.

Tatsächlich schwankte der Elastizitätsmodul für die Versuchskörper I - III jeweils zwischen $2,5$ und $2,8 \cdot 10^5 \text{ kg/cm}^2$. Die durch verschiedene Vorbehandlungen erzielten Unterschiede sind gegenüber diesen Abweichungen aber so groß, daß die letzteren unbeachtet bleiben können.

T a f e l 3

Versuchskörper Nr.	Statischer Elastizitätsmodul in kg/cm^2		Prismendruckfestigkeit nach Versuchsdurchführung
I	$2,7 \cdot 10^5$ vor Schwingungsbeanspruchung	$2,1 \cdot 10^5$ nach	296 kg/cm^2
II	$2,5 \cdot 10^5$ bei 18°C	$1,7 \cdot 10^5$ bei 100°C	308 kg/cm^2
III	$2,8 \cdot 10^5$ vor Infrarotbestrahlung	$3,5 \cdot 10^5$ nach	368 kg/cm^2

Das unterschiedliche Verhalten der einzelnen Versuchskörper läßt sich wie folgt erklären:

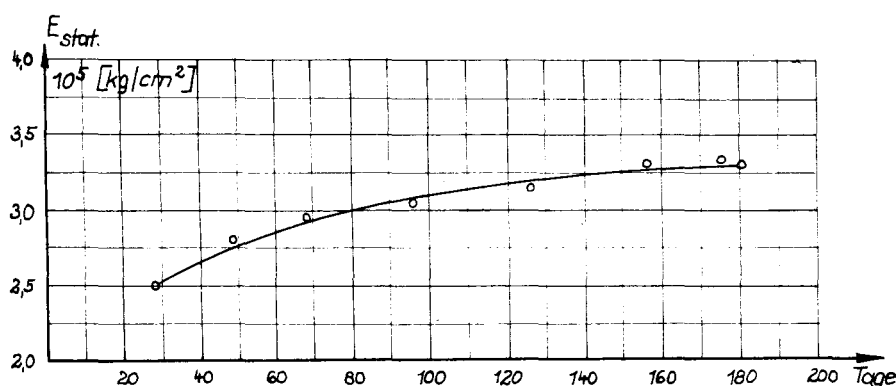
Versuchskörper I: Wie bereits unter Abs. 2.4 an Porenbeton festgestellt und besprochen wurde, wird auch für Beton nach Durchführung der Schwingungsanregung ein kleinerer Elastizitätsmodul ermittelt. Die Größenunterschiede sind jedoch für den festeren Beton wesentlich geringer.

Versuchskörper II: Die Stoffteilchen eines jeden Körpers besitzen bei erhöhten Temperaturen eine erhöhte Bewegungsenergie, d.h. sie unterliegen der Temperaturbewegung. Durch diese Temperaturbewegung tritt zwischen den einzelnen Betonteilchen eine Lockerung ein, die sich darin äußert, daß gegenüber der Normaltemperatur bei gleicher Spannung eine größere Dehnung erzielt wird. Außerdem entweicht bei der höheren Temperatur die eingeschlossene Feuchtigkeit (Kristall- und Kondenswasser), so daß dadurch die Kohäsion der Stoffteilchen ebenfalls herabgesetzt wird. Diese genannten Einflüsse setzen die Teilchenbindung und somit die Festigkeit des Materials herab.

Versuchskörper III: Durch die Infrarotbestrahlung des Betonkörpers wird vermutlich die Abbindezeit herabgesetzt und die Festigkeit erhöht. Der Vorgang läßt sich nur durch chemische Reaktionen erklären.

2.43 Beton-Elastizität in Abhängigkeit vom Alter

Bei den Untersuchungen ergab sich die Möglichkeit, den stat. Elastizitätsmodul des Betons in Abhängigkeit vom Herstellungsalter zu bestimmen. Dabei wurde festgestellt, daß der stat. Elastizitätsmodul eines unter stets gleichen klimatischen Bedingungen gelagerten Versuchskörpers mit dem Alter des Betons zunächst stetig zunimmt. Nach einer Beobachtungszeit



von etwa 180 Tagen scheint ein oberer Grenzwert erreicht zu sein. (s. Abb. 10).

Leider konnte bei diesen Untersuchungen parallel zu den Dehnungsmessungen

Abb. 10 Abhängigkeit des stat. E-Moduls vom Alter des Betons.

die Druckfestigkeit des Versuchskörpers nicht bestimmt werden, da durch die Zerstörung ein Abbruch der Versuchsreihe eingetreten wäre. Auf Grund der Untersuchungen der Eidgenössischen Materialprüfungs- und Versuchsanstalt (12) ist die Zunahme des Elastizitätsmoduls auf das Anwachsen der Druckfestigkeit mit dem Alter des Betons zurückzuführen.

2.5 Besprechung der Meßergebnisse

Werden die untersuchten Baustoffe nach ihrem Raumgewicht unterschieden, so können sie in zwei Gruppen aufgeteilt werden. In der ersten Gruppe sind die Stoffe mit einem größeren Raumgewicht als $1,6 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ und in der zweiten Gruppe die mit einem kleineren Raumgewicht enthalten. Diese Gruppenaufteilung wurde auf Grund der folgenden Abb. 11 gewählt, in der der

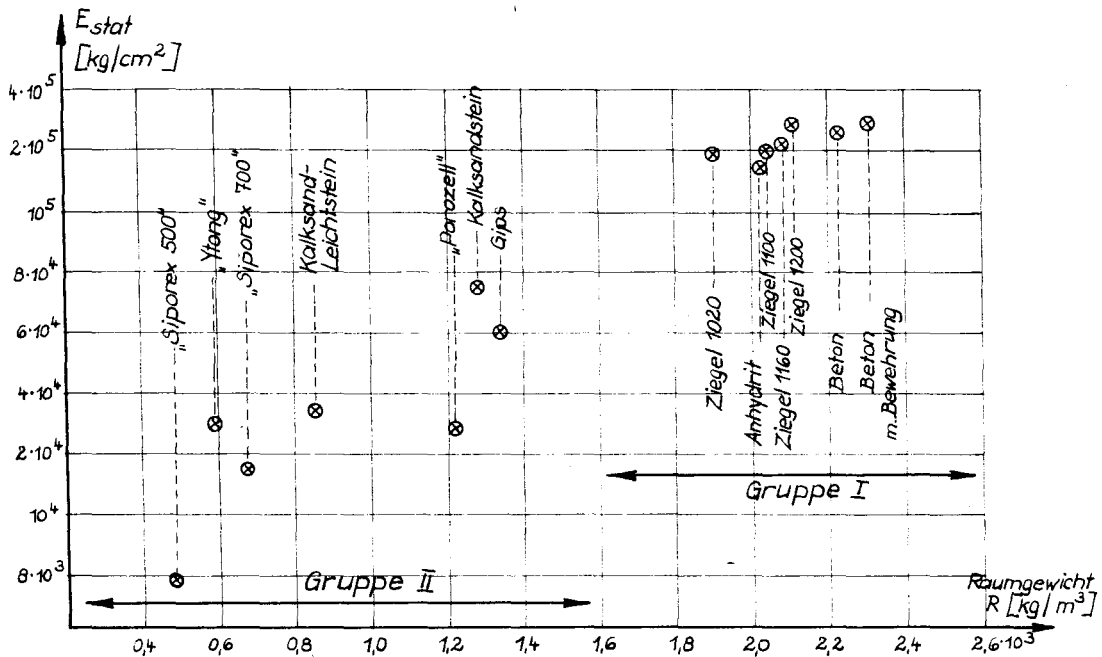


Abb. 11 Statischer Elastizitätsmodul in Abhängigkeit vom Raumgewicht des Baustoffes

statische Elastizitätsmodul in Abhängigkeit vom Raumgewicht der Baustoffe eingetragen ist. Die Baustoffe der Gruppe I unterschieden sich sowohl in ihrer Dichte als auch in der Größe des statischen Elastizitätsmoduls deutlich von den übrigen. Die Elastizitätsmoduln der Baustoffe der Gruppe I liegen in der Größenordnung von $2 \cdot 10^5 \text{ kg/cm}^2$, und es scheint mit steigendem Raumgewicht ein Anwachsen des Elastizitätsmoduls vorzuliegen. Von einigen Ausnahmen abgesehen, trifft diese Feststellung auch für die Baustoffe der Gruppe II zu. Entsprechend ihrem Raumgewicht besitzen die Versuchskörper der zweiten Baustoffgruppe gegenüber der ersten eine wesentlich lockerere Gefügestruktur. Bei ihnen sind die zwischen den einzelnen Masseteilchen wirkenden Kräfte (Zwischenmolekulare Kräfte s. Abb. 1) kleiner. Das bedeutet andererseits, daß ihre Elastizität und auch ihre Bruchfestigkeit geringer ist.

Wie aus den Untersuchungen des Abschnitts 2.4 hervorgeht, sind die Schwankungen der Elastizitätseigenschaften von Baustoffen, die unter gleichen Bedingungen hergestellt und gelagert sind für die Anwendung auf die Praxis unbedeutend. Diese material-

bedingten Schwankungen liegen in der Größenordnung von maximal $\pm 10\%$. Wesentlich entscheidender sind die unterschiedlichen Vorbehandlungen und die verschiedenen äußeren Einflüsse auf die Baustoffe, deren Wirkung in der Praxis immer vorhanden ist. Die von diesen Faktoren verursachten Schwankungen können bis zu 300% betragen. Die letztgenannten Einflüsse machen sich bei den Baustoffen der Gruppe II wesentlich stärker bemerkbar, als bei denen der Gruppe I, da durch einen geringeren Zusammenhalt der Masseteilchen äußere Kräfte wirksamer werden können.

Die statischen Elastizitätsmoduln (s. Tafel 2 und Abb. 11) wurden an der unvorbehandelten Materie, die zugleich frei von äußeren Einflüssen war, gewonnen. Neben dem Ziel, die elastischen Stoffkonstanten zu erfassen, sollten diese Untersuchungsergebnisse auch zum Vergleich für die mit Hilfe von schwingungstechnischen Untersuchungen gewonnenen Werte dienen.

3. Grundsätzliches über Schwingungen in Festkörpern

Die Schallübertragung in Festkörpern ist gleichbedeutend mit Schwingungen, die sich in diesen ausbreiten. Die schwingenden Bauteile übertragen ihre Bewegungsenergie auf die berührenden Luftteilchen, und die Schwingungen der Luftteilchen werden vom Ohr als Luftschall wahrgenommen. Damit ist mit einer Körperschallfortleitung stets eine Luftschallübertragung verbunden. Umgekehrt ist mit einer Luftschallabstrahlung eine Körperschallanregung verbunden. Dadurch wird die Existenz des Körperschalles im Wohnungsbau zu einem lästigen und nur mit Aufwand zu bekämpfenden Problem.

Je nach Anregungsart werden in Festkörpern verschiedene Schwingungs- oder Wellenformen unterschieden: 1. Dehnwellen, 2. Torsions- oder Schubwellen, 3. Transversal- oder Querwellen, 4. Longitudinal- oder Dichtwellen.

Eine der Dehnwelle verwandte Schwingungsform ist die Biegewelle. Sie tritt sowohl in Stäben als auch in Platten auf und ist in der Bauakustik von großer Bedeutung. Die im folgenden beschriebenen Untersuchungen beschränken sich auf die Ausbreitung von gedämpften Biegewellen in stabförmigen Versuchskörpern. In Abb. 12 ist das Schwingungsbild eines zu Biegeschwingungen angeregten Stabes veranschaulicht.

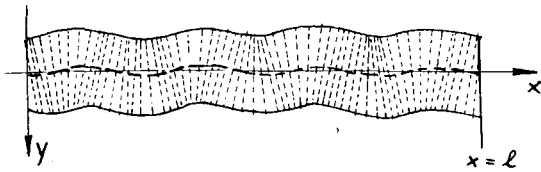


Abb. 12 Schwingungsbild von Biegewellen

Zur Berechnung des Schwingungsverhaltens geht man von der Differentialgleichung für Transversalschwingungen des prismatischen Stabes aus, die hier ohne Ableitung übernommen wurde (17, 18) .

Unter der Annahme, daß die Stablänge groß ist gegenüber den Querschnittsdimensionen,

erhält man für die Schwingungsamplitude X eines Stabelementes an der Stelle x eine Differentialgleichung 4. Ordnung:

$$\frac{\partial^4 X}{\partial x^4} - k^4 X = 0 \quad (4)$$

Hierin ist $k = \sqrt[4]{\omega \frac{M}{B}}$ (5)

Es bedeuten ferner:

$\omega = 2\pi f$ die Kreisfrequenz

$M = \rho \cdot F$ die Stabmasse pro Längeneinheit

($\rho = \frac{\gamma}{g}$ = Dichte, F = Querschnittsfläche = $b \cdot h$)

$B = E \cdot J$ die Biegesteifigkeit

E = Elastizitätsmodul und

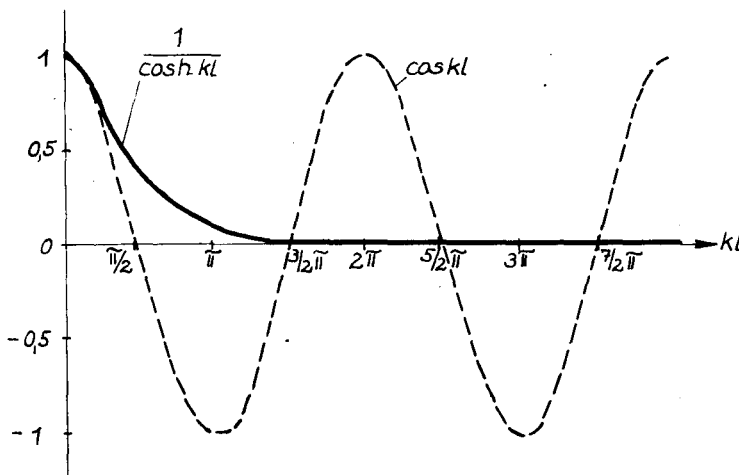
$J = \frac{b \cdot h^3}{12}$ = Flächenträgheitsmoment des Querschnitts.

Die allgemeine Lösung von Gleichung (4) lautet

$$X = c_1 \sin kx + c_2 \cos kx + c_3 \sinh kx + c_4 \cosh kx \quad (6)$$

Unter Berücksichtigung der Randbedingungen für den freischwingenden Stab (Biegemomente und Querkräfte gleich Null an beiden Stabenden) ergibt sich bei der Bestimmung der Konstanten $c_1 \dots c_4$ die Bedingung:

$$\cos kl \cdot \cosh kl = 1 \quad (7)$$



Dieser Zusammenhang ist in Abb. 13 graphisch dargestellt. Die Schnittpunkte beider Kurvenzüge liefern die Wurzeln $S_n = k_n l$ der Gleichung (7).

Abb. 13 Darstellung der Gleichung $\cosh kl \cdot \cos kl = 1$

Die ersten sechs aufeinanderfolgenden Werte lauten:

$S_n = k_0 l$	$k_1 l$	$k_2 l$	$k_3 l$	$k_4 l$	$k_5 l$	$k_n l$
0	4,73	7,85	11,00	14,14	17,28		$\frac{2n+1}{2} \cdot \pi$

Durch Umformung der Gleichung (5) lassen sich nun mit Hilfe dieser Zahlen die Eigenfrequenzen des Stabes berechnen:

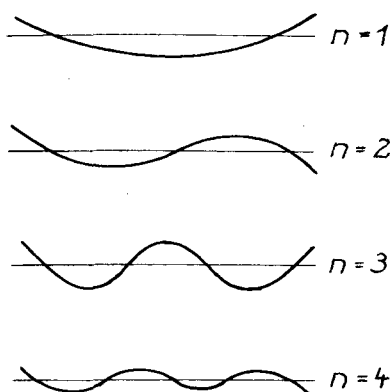
$$f_n = \frac{S_n^2}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{E \cdot J}{\rho \cdot F}} \quad (8)$$

Zur Bestimmung des Elastizitätsmoduls wird die Gleichung (8) nach E aufgelöst:

$$E = \frac{4\pi^2 \rho \cdot F l^4}{S_n^4 \cdot J} \cdot f_n^2 = \frac{48\pi^2 \rho l^4}{S_n^4 h^2} \cdot f_n^2 \quad (9)$$

ρ , l und h sind durch die Eigenschaften und Abmessungen des Stabes festgelegt.

Für $S_n = k_n l$ sind entsprechend der jeweiligen Schwingungsform des Stabes die oben angegebenen Zahlen einzusetzen. Die Eigenfrequenzen f_n werden durch Messung bestimmt.



In Abb. 14 sind die Schwingungsformen für die ersten vier Eigenfrequenzen eines Stabes mit beiderseitig freien Enden dargestellt.

Abb. 14 Darstellung der ersten vier Eigenschwingungsformen.

Zur Kennzeichnung des schwingungstechnischen Verhaltens von Festkörpern sind außer dem Elastizitätsmodul die Dämpfungseigenschaften des Materials von Bedeutung.

In der Theorie der erzwungenen Schwingungen wird als Maß der vorliegenden Dämpfung die Halbwertsbreite einer Resonanzkurve verwendet (19). Sie ist definiert als Abstand der beiden Frequenzen, bei denen die Schwingungsenergie auf die Hälfte ihres Maximalwertes bzw. die Amplitude auf den $\frac{1}{\sqrt{2}}$ -fachen Wert (= Abfall um 3 dB) abgesunken ist. Es ist allgemein:

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{\Lambda}{\pi} \quad (10)$$

mit Δf = Halbwertsbreite
 f_0 = Resonanzfrequenz
 Λ = log. Dekrement

Für das logarithmische Dekrement Λ gilt andererseits :

$\Lambda = \pi \cdot \eta$, worin η der Verlustfaktor des Materials ist.

Somit folgt für den Verlustfaktor $\eta = \frac{\Delta f}{f_0}$ (11)

Er wurde aus den gemessenen Halbwertsbreiten und Resonanzfrequenzen für die angegebenen Stoffe berechnet.

Eine weitere Möglichkeit zur Bestimmung des Verlustfaktors besteht in einer Messung der Abklingzeit T. Sie ist definiert als die Zeit, in der der Energiewert auf $1/10^6$ seines Anfangswertes bzw. um -60 dB absinkt. Durch Umformungen mit Hilfe der Dämpfungskonstanten erhält man für den Verlustfaktor:

$$\eta = \frac{2,20}{T \cdot f_0} \quad (12)$$

In der Bauakustik interessiert schließlich noch die Längendämpfung oder die Pegelabnahme in dB/m. Diese Dämpfung ist abhängig von der Wellenlänge und ergibt nach einer Umrech-

nung über den Absorptionskoeffizienten (7) :

$$D_1 = \frac{13,6 \cdot \eta}{\lambda} \quad \text{dB/m} \quad (13)$$

Hierin ist $\lambda = \frac{2\pi}{k}$ die Biegewellenlänge im Material. Sie ist von der Frequenz abhängig und kann mit Hilfe von Gleichung (5) berechnet werden. Für die Eigenfrequenzen des Stabes ist

$$\lambda_n = \frac{2\pi}{k_n} = \frac{2\pi}{S_n} \cdot l$$

Die hier zusammengestellten theoretischen Beziehungen bilden die Grundlage zur Durchführung der in den folgenden Absätzen beschriebenen schwingungstechnischen Untersuchungen.

4. Bestimmung des dynamischen Elastizitätsmoduls

Die im folgenden beschriebenen Elastizitätskonstanten charakterisieren sowohl die Ausbreitung von Dehnwellen als auch die von Biegewellen in dünnen Stäben. Unter dünnen Stäben sind solche zu verstehen, deren Breite und Höhe klein gegen die Wellenlängen sind. In dem untersuchten Frequenzbereich ist diese Voraussetzung in jedem Falle erfüllt.

Es hat sich gezeigt, daß bei einer dynamischen Formänderung mit sinusförmigem Verlauf, zwischen der Spannung σ und der relativen Längenänderung ϵ eine Phasenverschiebung einzuführen ist. Somit ist anzusetzen:

$$\bar{\sigma} = E (1 + i \eta) \epsilon$$

Hierin stellt $E \cdot (1 + i \eta) = \bar{E}$ einen komplexen Elastizitätsmodul dar und η ist die bereits genannte Verlustzahl, die das Verhältnis von irreversibler zu reversibler Formänderungsarbeit angibt. Die Phasenverschiebung zwischen $\bar{\sigma}$ und ϵ ist umso kleiner, je kleiner die Dämpfung des jeweiligen Materials ist und kann bei geringen Verlusten vernachlässigt werden.

4.1 Meßverfahren und Versuchsdurchführung

Ein zu Biegeschwingungen angeregter Stab schwingt grundsätzlich mit der jeweiligen Anregungsfrequenz. Wie jedes schwingungsfähig System besitzt er aber bestimmte, von den rücktreibenden Kräften, den Trägheitseigenschaften und der Dämpfung abhängige Eigenfrequenzen.

Die Anzahl und Lage dieser Eigenfrequenzen ist abhängig von den Materialeigenschaften und den Abmessungen des Versuchskörpers. Bei der gewählten Stablänge lag der tiefste Wert etwa zwischen 50 und 200 Hz. Die höheren Eigenfrequenzen sind nicht harmonisch zu dieser Grundfrequenz, sondern verhalten sich hierzu entsprechend Gleichung (8) wie die Quadrate der S_n -Werte. Die Bestimmung der Eigenfrequenzen und der Halbwertsbreiten erfolgte bei diesen Frequenzen aus den jeweiligen Resonanzkurven. Die höchsten Frequenzen, bei denen mit ausreichender Sicherheit gemessen werden konnte, lagen je nach Material etwa zwischen 1000 Hz und 2000 Hz.

Zur Durchführung der schwingungstechnischen Untersuchungen wurden Stäbe von der in Abschn. 2.2 beschriebenen Art verwendet. Die Anregung der Versuchskörper erfolgte mittels einer periodischen Wechselkraft. Am Ende der Stäbe wurde mit Gips oder Klebstoff ein schmaler Eisenblechstreifen befestigt, der durch das Feld einer Magnetspule im Rythmus des durchfließenden Wechselstroms angezogen wurde. Zur Vermeidung von Nichtlinearitäten erhielt die Spule eine Gleichstrom-Vormagnetisierung. Die Versuchsanordnung zur Erzeugung von Biegeschwingungen ist in Abb. 15 dargestellt.

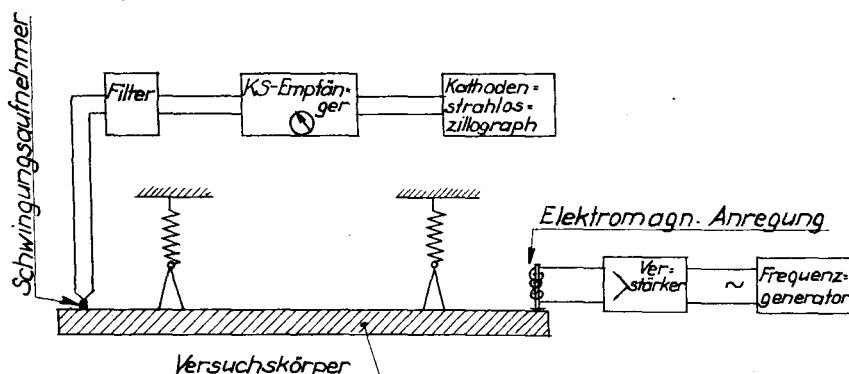


Abb. 15 Versuchsanordnung für schwingungstechnische Untersuchungen

Der zur Anregung verwendete Wechselstrom wurde einem Meßgenerator guter Frequenzkonstanz und Ablesegenauigkeit entnommen und über einen Verstärker dem elektromagnetischen Anregungssystem zugeführt. Zur Aufnahme der Schnelle-Werte des Versuchsstabes diente ein piezoelektrischer Schwingungsaufnehmer, mit dem in Verbindung mit einem Körperschallmeßgerät die Schnellen absolut bestimmt werden konnten.

Um die durch den Aufbau der Versuchsanordnung hervorgerufene Dämpfung möglichst klein zu halten, muß die Aufhängung bzw. Auflagerung der Stäbe in den Knoten der jeweiligen Eigenschwingungsformen erfolgen. Hierdurch sind gleichzeitig die Randbedingungen des beiderseitig freien Stabes erfüllt, auf denen die Berechnung des Elastizitätsmoduls nach Gleichung (9) beruht.

Zur Bestimmung der Knoten bei den verschiedenen Eigenfrequenzen wurden bei elastischer Aufhängung die Schnelle - Werte entlang des Stabes mit 5 cm bzw. bei höheren Frequenzen mit 2,5 cm Meßpunktabstand ermittelt. Aus der graphischen Darstellung dieser Meßwerte konnte die Lage der Knoten mit ausreichender Genauigkeit bestimmt werden. (s. auch Abb. 16).

Bei späteren Untersuchungen wurden die Stäbe nicht elastisch aufgehängt, sondern auf 2 Schneiden gelegt. Die Lage der äußeren (endnahen) Knoten wurde rechnerisch aus der Schwingungslinie ermittelt. Mit Gleichung (6) folgt unter Berücksichtigung der Randbedingungen

$$X = C(\cos kx + \cosh kx - \sin kx - \sinh kx) = C(\sqrt{1 - \sin 2kx} + e^{-kx}) \quad (14)$$

Die Wurzeln dieser Gleichung liefern für die Lage der äußeren Knoten:

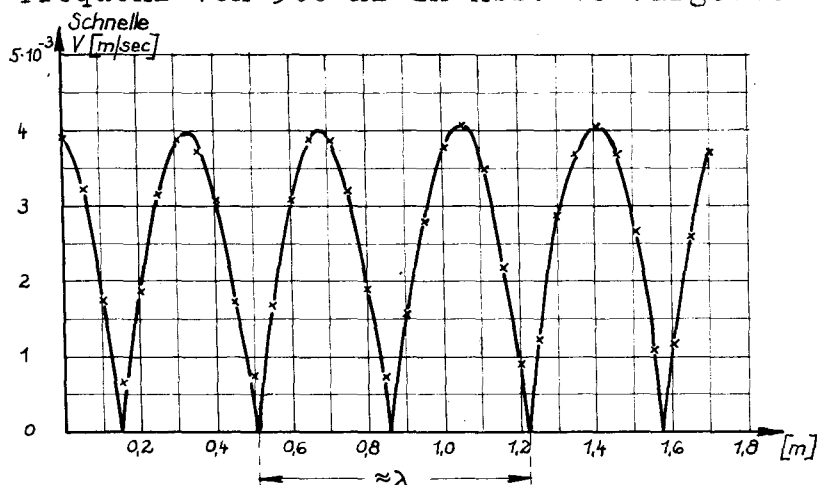
$$x_0 = \frac{1,05}{k_n} = \frac{1,05}{S_n} \cdot l \quad (15)$$

worin l die Gesamtlänge des Stabes bedeutet. Die Auflager wurden für die verschiedenen Eigenschwingungsformen dementsprechend bei $x_0 = 0,224 l$; $0,134 l$; $0,095 l$; $0,074 l$, usw. gewählt. Diese Werte stimmen mit den durch Messung ermittelten Knotenlagen gut überein.

4.2 Versuchsergebnisse

Vor den Untersuchungen an Baustoffen wurden Resonanzfrequenzmessungen an einem quadratischen Stahlstab mit 1,6 cm x 1,6 cm Querschnitt durchgeführt und durch Vergleich mit den Ergebnissen der angewandten Theorie eine Beurteilung des Meßverfahrens vorgenommen.

Bei der Biegewellenanregung mit einer Eigenfrequenz des Versuchskörpers bilden sich auf diesem stehende Wellen aus. Der entsprechende Verlauf der Schnelle-Werte ist für eine Frequenz von 300 Hz in Abb. 16 dargestellt. Wie aus dieser Ab-



bildung zu erkennen ist, haben die Aufhängepunkte - da sie sich in den Knoten befinden - keinen Einfluß auf die Schwingungsamplitude. Da bei allen Frequenzwerten die Schwingungsknoten scharf ausgebildet waren, ließen sich die Biegewellen-

Abb. 16 Schnelleverlauf einer zu Biegeschwingungen angeregten Stahlstange (300 Hz)

längen und die Knotenlagen aus den Schwingungsbildern, von denen nur eines hier aufgezeichnet ist, gut ermittelt.

Die Schnellewerte wurden an der Stahlstange mit einem mittleren Fehler von ca. $\pm 5\%$ und bei den Baustoffen von ca. $\pm 8\%$ bestimmt.

Die Gegenüberstellung des statischen und des dynamischen

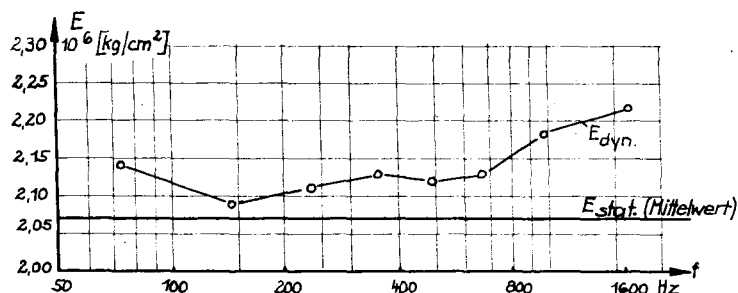


Abb. 17 Vergleich von statischem und dynamischem Elastizitätsmodul an Stahl.

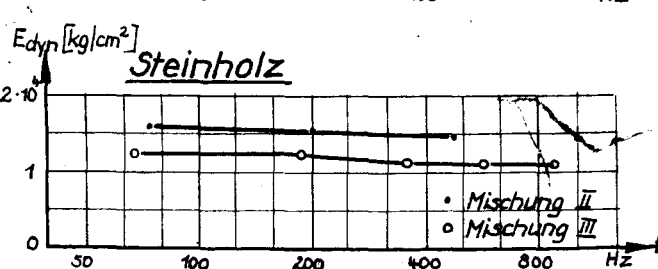
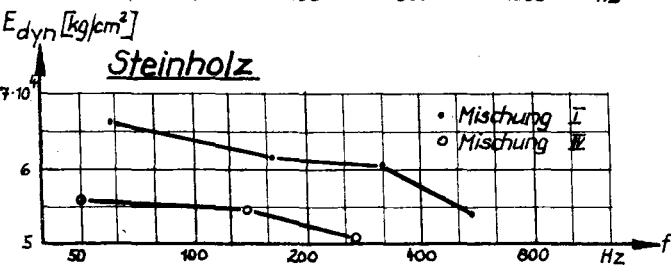
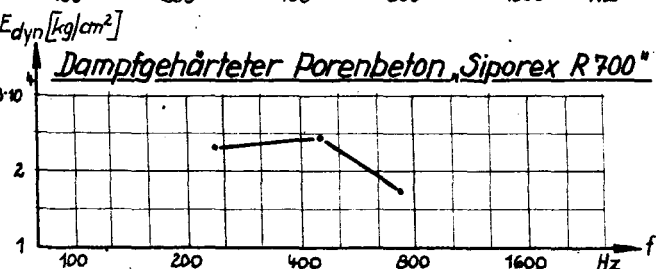
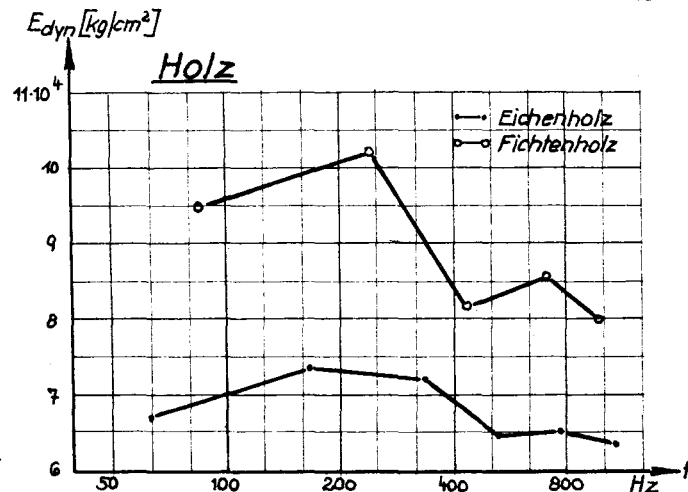
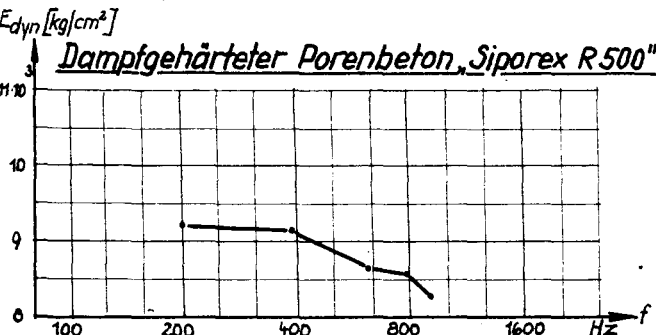
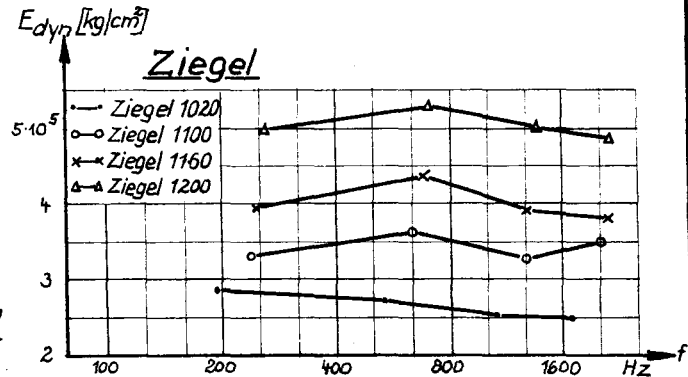
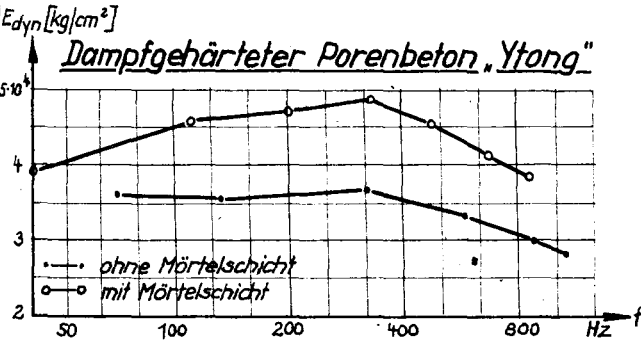
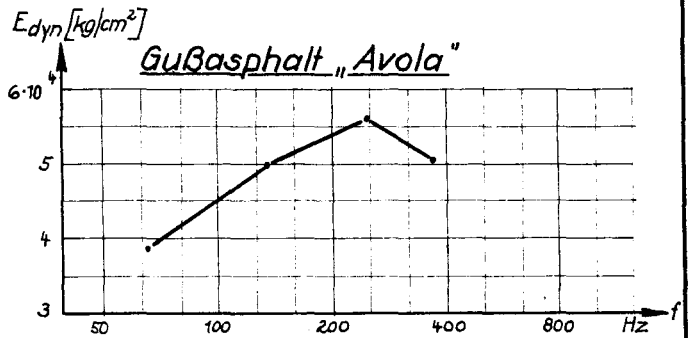
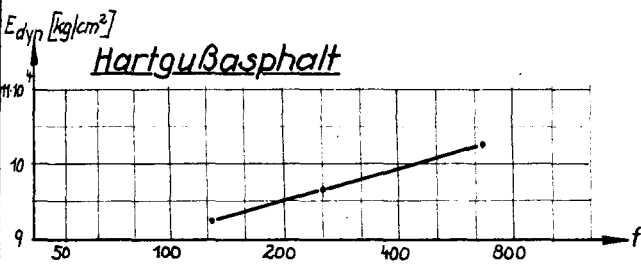
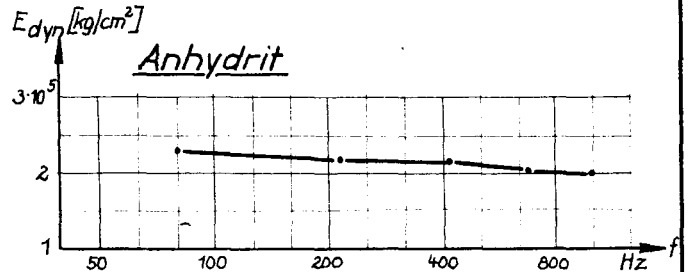
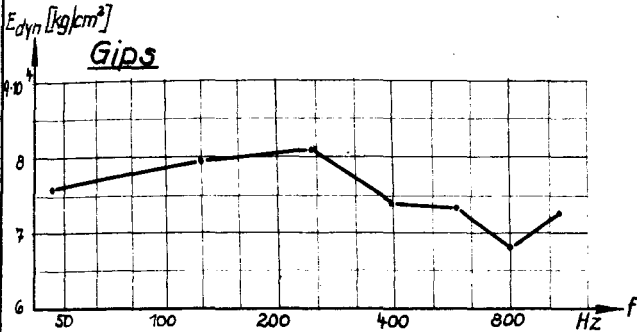
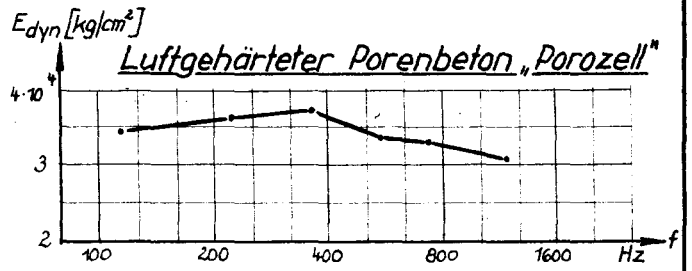
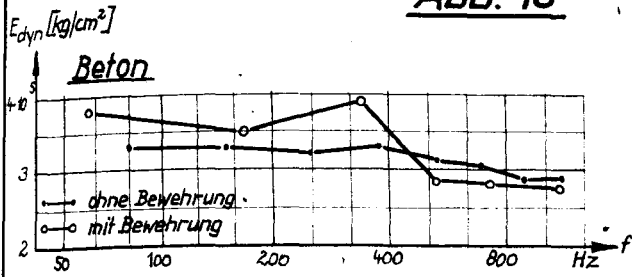
E-Moduls der Abb. 17 zeigt, daß der dynamische Elastizitätsmodul etwas größer ist als der statische und mit wachsender Frequenz schwach ansteigt.

Nach den Messungen an Stahl wurden die Untersuchungen zunächst auf Beton und Porenbeton ("Porozell") ausgedehnt, zwei Baustoffen mit unterschiedlicher Gefügestruktur. Auch hier zeigte sich, wie bei allen weiteren untersuchten Baustoffen, daß der mit dem geschilderten Verfahren bestimmte dynamische Elastizitätsmodul etwas größer ist als der statische. Bei verschiedenen Materialien tritt außerdem eine schwache Frequenzabhängigkeit der Werte auf. Besonders bei den Stoffen mit größerer innerer Dämpfung (z.B. Gußasphalt, Holz, usw.) steigt der Elastizitätsmodul bis in das Gebiet von 300 - 600 Hz an und fällt häufig bei höheren Frequenzwerten wieder ab.

Bei der Messung der Resonanzfrequenzen konnte vor allem für die Baustoffe mit lockerer Gefügestruktur (Porenbeton) beobachtet werden, daß die Versuchskörper von der Anregungsdauer abhängige Resonanzfrequenzwerte zeigten. Mit wachsender Anregungsdauer verschiebt sich die Resonanzfrequenz zu tieferen Frequenzwerten und nimmt etwa nach 3 Stunden einen konstanten Wert an. Die Verschiebung der Eigenschwingungswerte kann bis zu 6 Hz betragen. Diese Erscheinung ist vermutlich auf die ständigen Kraftrichtungswechsel zurückzuführen, die innerhalb der Versuchskörper Ermüdungserscheinungen (s. Absatz 2.41) verursachen. Sie bewirken eine Abnahme des Elastizitätsmoduls und damit eine Abnahme der Resonanzfrequenz. Der konstante Eigenfrequenzwert wurde jeweils durch künstliche Ermüdung erreicht.

Der frequenzabhängige Verlauf der nach dieser Methode ermittelten dynamischen Elastizitätsmoduln ist in der Abb. 18 auf Seite 44 wiedergegeben. Die daran anschließende Tafel 4 enthält die Mittelwerte der dynamischen Elastizitätsmoduln und zum Vergleich auch die statischen Werte, soweit diese bestimmt werden konnten. Die mechanischen Eigenschaften der untersuchten Baustoffe sind in Abschnitt 2.21 zusammengestellt.

Abb. 18



T a f e l 4

B a u s t o f f	Elastizitäts- moduln nach dynamischer Meßmethode *)	Elastizitäts- moduln nach statischer Meßmethode
a Beton	$3,1 \cdot 10^5$	$2,5 \cdot 10^5 \text{ kg/cm}^2$
b Beton m. Bewehrung	$3,2 \cdot 10^5$	$2,8 \cdot 10^5 \text{ kg/cm}^2$
c Gips	$7,5 \cdot 10^4$	$6,0 \cdot 10^4 \text{ kg/cm}^2$
d Anhydrit	$2,0 \cdot 10^5$	$1,4 \cdot 10^5 \text{ kg/cm}^2$
e Hartguß- asphalt	$9,5 \cdot 10^4$	$6,3 \cdot 10^4 \text{ kg/cm}^2$
f Gußasphalt ("Avola")	$4,7 \cdot 10^4$	-
g Luftgeh. Porenbeton ("Porozell")	$3,3 \cdot 10^4$	$2,8 \cdot 10^4 \text{ kg/cm}^2$
h Ziegelkörper Ziegel 1020 Ziegel 1100 Ziegel 1160 Ziegel 1200	$2,5 \cdot 10^5$ $3,3 \cdot 10^5$ $3,9 \cdot 10^5$ $4,9 \cdot 10^5$	$1,8 \cdot 10^5 \text{ kg/cm}^2$ $2,0 \cdot 10^5 \text{ kg/cm}^2$ $2,4 \cdot 10^5 \text{ kg/cm}^2$ $2,9 \cdot 10^5 \text{ kg/cm}^2$
i Kalksandstein	-	$7,5 \cdot 10^4 \text{ kg/cm}^2$
k Kalksand-Leicht- stein	-	$3,4 \cdot 10^4 \text{ kg/cm}^2$
l Dampfgeh. Poren- beton ("Ytong")	$3,3 \cdot 10^4$	$3,0 \cdot 10^4 \text{ kg/cm}^2$
m Dampfgeh. Poren- beton ("Ytong") m. Mörtelschicht	$4,0 \cdot 10^4$	-
n Dampfgeh. Poren- beton ("Siporex") R 500 R 700	$8,8 \cdot 10^3$ $2,0 \cdot 10^4$	$7,9 \cdot 10^3 \text{ kg/cm}^2$ $1,4 \cdot 10^4 \text{ kg/cm}^2$
o Eichenholz	$6,8 \cdot 10^4$	$5,8 \cdot 10^4 \text{ kg/cm}^2$
p Fichtenholz	$8,9 \cdot 10^4$	$7,2 \cdot 10^4 \text{ kg/cm}^2$
q Steinholz Mischung I Mischung II Mischung III Mischung IV	$6,1 \cdot 10^4$ $1,1 \cdot 10^4$ $1,5 \cdot 10^5$ $5,4 \cdot 10^4$	-

*) Mittel der in Abb. 18 frequenzabhängig aufgetragenen Meßwerte.

Die schwingungstechnischen Untersuchungen erfolgten im Anschluß an die Dehnungsmessungen. Für Eichen- und Fichtenholz gelten die angegebenen Elastizitätsmoduln für die Beanspruchung parallel zur Faserrichtung. An den Probekörpern aus Kalksandsteinen konnten keine schwingungstechnischen Untersuchungen durchgeführt werden, da diese nicht prüffähig waren.

4.3 Abhängigkeit der dynamischen Elastizität von äußeren Einflüssen

In Anlehnung an die Untersuchungen von Kunststoffen (11) ist zu erwarten, daß die untersuchten Baustoffe ebenfalls eine Temperaturabhängigkeit ihrer elastischen Eigenschaften zeigen. Bei einer praktischen Anwendung im Bauwesen ist aber diese Erscheinung von untergeordneter Bedeutung. Dagegen sind im Bauwesen der Einfluß des Feuchtigkeitsgehaltes und der Einfluß von Mörtelfugen und Mörtelschichten auf die dynamischen Eigenschaften von großer Bedeutung.

4.31 Einfluß der Feuchtigkeit

Ein Versuchskörper aus dampfgehärtetem Porenbeton ("Ytong") wurde 24 Stunden in Wasser gelagert. Nach dieser Tauchzeit hatte er 53 Gew.-% Feuchtigkeit aufgenommen. (Ausgangsfeuchtigkeit: 7 Gew.-%). Während der anschließenden Trocknung dieses Versuchskörpers unter normalen atmosphärischen Bedingungen wurde in geeigneten Abständen der dynamische Elastizitätsmodul bestimmt. Die Ergebnisse sind in Abb. 21 aufgetragen.

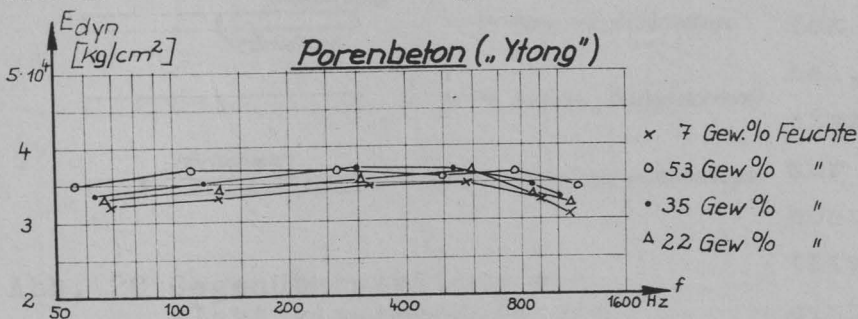


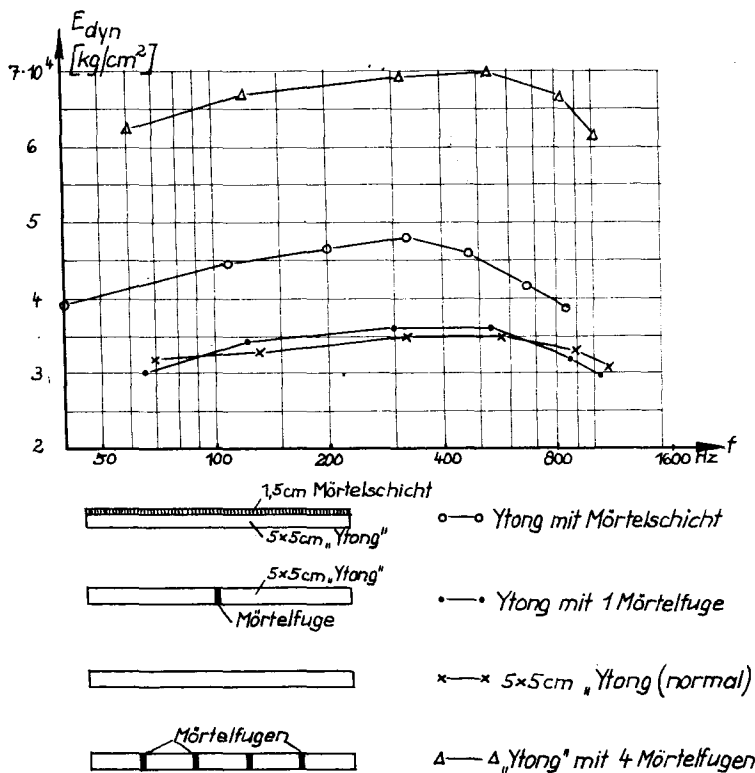
Abb. 19 Abhängigkeit des dynamischen Elastizitätsmoduls vom Feuchtigkeitsgehalt des Porenbetons

Die Differenzen der Meßwerte bei den verschiedenen Feuchtigkeitsgehalten sind gering, so daß dieser Abhängigkeit für die Praxis keine Bedeutung beizumessen ist, da derartige

extrem hohen Feuchtigkeiten im Wohnungsbau nicht vorliegen. Analoge Meßergebnisse konnten auch für Beton in Abhängigkeit von der Abbindezeit festgestellt werden. Mit zunehmender Abbindezeit verliert sich der Wassergehalt der Versuchskörper, und die Dämpfung sowie der dynamische Elastizitätsmodul nehmen ab.

4.32 Einfluß der Mörtelschichten und Mörtelfugen

Die im Absatz 4.2 angegebenen Versuchsergebnisse wurden an gleichförmigen Proben der Baustoffe gewonnen. Im Wohnungsbau werden diese Baustoffe jedoch stets mit Fugen oder Schichten (Putz) aus Mörtel versehen, so daß den Bedingungen der Praxis die Kombination des jeweiligen Baustoffes mit einer Mörtelschicht näher kommt. Ein normaler Versuchskörper aus Porenbeton ("Ytong") wurde daher entsprechend der Abb. 20 sowohl



mit einer Mörtelfuge als auch mit einer Mörtelschicht (MV 1 : 2 : 8) versehen. Der aus dem oben genannten Meßverfahren erhaltene Elastizitätsmodul ist in Abb. 20 eingetragen. Die Mörtelschicht trägt zu einer deutlichen Erhöhung der Elastizität gegenüber dem normalen Porenbeton bei, während durch die einzelne Mörtelfuge nur eine geringe Erhöhung der Elastizitätseigenschaften eintritt.

Abb. 20 Gegenüberstellung von Elastizitätsmoduln von Porenbeton ("Ytong")

Da sowohl die Mörtelschicht als auch der Porenbeton annähernd gleiche Dichte besitzen und die neutrale Faser in der Stabmitte bleibt,

wurde bei der Berechnung diese Materialkombination als ein homogener Körper angesehen.

Gegenüber einem normalen Probekörper aus Porenbeton ("Ytong") wird der Elastizitätsmodul durch das Vorhandensein von 4 Mörtelfugen (Mischungsverhältnis Zement : Sand = 1 : 2) im gesamten Frequenzgebiet etwa um den Faktor 2 heraufgesetzt (s. Abb. 22). Aus dieser Beobachtung ist die Konsequenz zu ziehen, daß bei Wänden, die ja eine große Anzahl solcher Mörtelfugen aufweisen, ein größerer Elastizitätsmodul zu erwarten ist, als er für die entsprechenden reinen Baustoffe gewonnen wurde.

Eine übereinstimmende Erhöhung der Elastizität konnte an Versuchskörpern aus Ziegelmaterial (Brenntemperatur 1100°C) mit ebenfalls 4 Mörtelfugen festgestellt werden. Auch bei diesen Körpern wurde gegenüber dem reinen Material ein um den Faktor 2 größerer Elastizitätsmodul gemessen.

Die in der Tafel 4 angegebenen Ziegelkörper sind Sonderanfertigungen für die beschriebenen Untersuchungen. Da diese

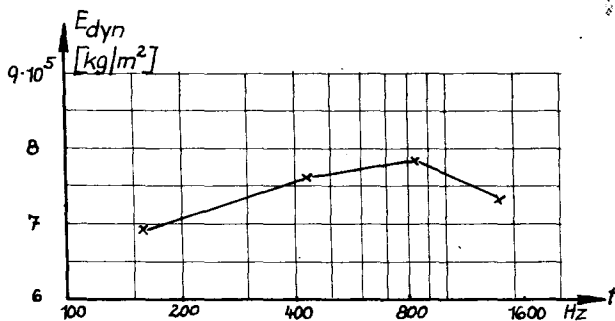


Abb. 21 Versuchskörper aus Mauerziegel Mz 150

Körper bei der Herstellung aber außerordentlich fest-zusammengepreßt und ungewöhnlich hohen Brenntemperaturen unterzogen wurden, ist das Material vergleichbar mit Klinkern verschiedener Qualität. Um entsprechende Werte auch für

gewöhnliches Ziegelmaterial zu erhalten, wurden 5 handelsübliche Ziegelsteine mit Mörtelfugen zu einem "Stab" verarbeitet. Die Mörtelfugen des Stabes waren ebenfalls aus Zement und Sand im Mischungsverhältnis 1 : 2 hergestellt. Aus den Resonanzfrequenzen wurde der in Abb. 23 angegebene Elastizitätsmodul erhalten. Entsprechend der Struktur der Mauerziegel - verglichen mit der von Beton oder Anhydrit - müßte der Elastizitätsmodul einen geringeren Wert besitzen. In dem Frequenzbereich zwischen 100 und 1000 Hz konnten wegen der zu geringen

Länge der Mauerziegel keine Elastizitätsuntersuchungen an diesen selbst vorgenommen werden.

Auf Grund der oben beschriebenen Messungen an Porenbeton und Ziegelkörpern (Klinker) mit Mörtelfugen muß erwartet werden, daß der Elastizitätsmodul für das reine Mauerziegelmaterial niedriger ist und die Mörtelfugen zu einer Erhöhung der elastischen Eigenschaften beitragen. In wieweit diese Feststellung auch für die Verwendung des üblichen Kalkzementmörtels (MV 1 : 2 : 8), wie er in der Praxis angewandt wird, zutrifft, konnte nicht festgestellt werden, da durch solche Mörtelfugen der für die Untersuchungen erforderliche Zusammenhalt der Versuchskörper nicht gewährleistet ist.

4.4 Besprechung der Meßergebnisse

Ein Vergleich der statischen und dynamischen Elastizitätsmoduln ergibt, daß die dynamischen Werte in allen Fällen größer sind und eine gewisse Frequenzabhängigkeit zeigen. Um bei Baustoffen mit lockerer Gefügestruktur eindeutige Meßwerte zu erhalten, ist es erforderlich, die Versuchskörper eine gewisse Zeit vor den eigentlichen Messungen mit möglichst hoher Schwingungsenergie anzuregen. Diese Beanspruchungen verursachen Änderungen innerhalb der Struktur und stellen gewissermaßen eine künstliche Alterung dar. Würden die Messungen an einem unvorbehandelten Versuchskörper vorgenommen, so ergäben sich zu hohe Werte für den dynam. Elastizitätsmodul. (s. Absatz 2.41).

Die Untersuchungen an Porenbeton ("Ytong") mit unterschiedlichem Feuchtigkeitsgehalt zeigen, daß der Elastizitätsmodul mit zunehmendem Feuchtigkeitsgehalt geringfügig ansteigt. Jedoch ist dieser Einfluß bei den in der Praxis auftretenden Feuchtigkeiten ohne Bedeutung.

Wird dagegen ein Versuchskörper aus einheitlichem Material mit mehreren Mörtelfugen ausgebildet, so erhöht sich dadurch der ursprüngliche Elastizitätsmodul zum Teil recht erheblich.

5. Bestimmung der Energieverluste

Wie der Elastizitätsmodul, so ist auch die Verlustzahl eine Materialkonstante des jeweiligen Baustoffes. Es konnte z.B. beobachtet werden, daß ein Gußasphalt- und ein Betonestrich auf derselben Dämmschicht und auf derselben Rohdecke verlegt, einen unterschiedlichen Trittschallschutz zeigen. Innerhalb des in der Bauakustik angewandten Frequenzbereiches zeigt der Gußasphaltestrich gegenüber dem Betonestrich im allgemeinen einen um ca. 3 dB günstigeren Trittschallschutz. Da beide Materialien etwa gleiches Raumgewicht und gleiche Dicke besitzen, führte Cremer (20, 21) diese Abweichungen auf die größere innere Dämpfung des Gußasphaltes zurück.

Wie bei dem Beispiel der Klopferschallübertragung ist die Materialdämpfung bei allen Körperschallübertragungen in Bauwerken von Bedeutung. So kann beispielsweise eine Deckenkonstruktion gut trittschalldämmend ausgebildet sein, aber bei geringer Dämpfung der Wandbaustoffe wird das Bauwerk stets eine sogenannte Hellhörigkeit besitzen.

5.1 Meßverfahren und Versuchsdurchführung

Zur Bestimmung der Verlustzahl wurden zwei Meßmethoden angewandt. Wie im Absatz 3 angegeben ist, läßt sich die Verlustzahl sowohl aus der Halbwertsbreite der Resonanzkurve als auch aus der Abklingzeit einer Resonanzschwingung ermitteln. Die Versuchskörper mußten in den Schwingungsknoten gelagert werden, um einen Energieentzug und damit eine zusätzliche Dämpfung zu vermeiden. Die Auflager wurden nach Gleichung (15) berechnet und erforderlichenfalls experimentell geringfügig nachjustiert. Der Schwingungsaufnehmer wurde stets in einem Schwingungsmaximum der Versuchskörper, im allgemeinen am Ende des Stabes, befestigt.

Zur Festlegung der Resonanzkurven wurde die Schnellewerte in Frequenzschritten von 0,5 bis 1 Hz bestimmt. Die Schnelle-Werte in Abhängigkeit von der Frequenz ergeben die Resonanzkurve, deren Halbwertsbreite nach Absatz 3 zur Berechnung der Verlustzahl herangezogen wird. Bei annähernd gleichen Frequenzwerten ist einer breiten Resonanzkurve (z.B. Gußasphalt) eine

größere Dämpfung und somit eine größere Verlustzahl als einer schmaleren Resonanzkurve (z.B. Beton) zuzuordnen.

Die Bestimmung der Abklingzeit erfolgte bei der gleichen Auflagerung und Befestigung des Schwingungsaufnehmers wie für das eben geschilderte Verfahren. Wird der Versuchskörper bei einer Resonanzfrequenz zu Schwingungen angeregt, so nimmt die Schwingungsenergie des Stabes nach Unterbrechung der äußeren Anregung nach einer e-Funktion ab. Mit Hilfe eines Pegelschreibers wird diese logarithmische Abnahme in eine lineare umgewandelt, so daß die Abklingzeiten in sec direkt ablesbar sind. Auf Grund der in Gleichung (12) angegebenen Beziehung lassen sich aus den gemessenen Abklingzeiten die zugehörigen Verlustzahlen berechnen. Die Abklingzeiten der Baustoffe wurden bei jeder Meßfrequenz etwa 8-10 mal bestimmt und der sich ergebende Mittelwert zur Berechnung verwandt. Die Streuungen der Einzelmeßwerte waren von untergeordneter Bedeutung. Die Dämpfung von Versuchskörpern ist bei vergleichbaren Resonanzfrequenzen umso größer, je geringer die Abklingzeit ist. Die Eignung der angewandten Meßverfahren wurde am Stahl überprüft. (s. auch Abb.23, S.54). Dabei konnte festgestellt werden, daß der Einfluß zusätzlicher Dämpfungserscheinungen (Energieentzug) von untergeordneter Bedeutung ist.

5.2 Versuchsergebnisse

Die hier angegebenen Versuchsergebnisse sind an Baustoffen unter normalen Lagerungsbedingungen gewonnen. Für das Raumgewicht und den Feuchtigkeitsgehalt gelten die Angaben nach Absatz 2.21.

Für Gußasphalt und Beton, zwei Baustoffe mit extremen Dämpfungseigenschaften ist jeweils eine Resonanzkurve in der Abb. 22 angegeben.

Da zu vermuten war, daß die Verlustzahl der verschiedenen Baustoffe eine Frequenzabhängigkeit besaß, sind die Halbwertsbreiten bei allen Resonanzfrequenzen innerhalb des Beobachtungsgebietes bestimmt worden.

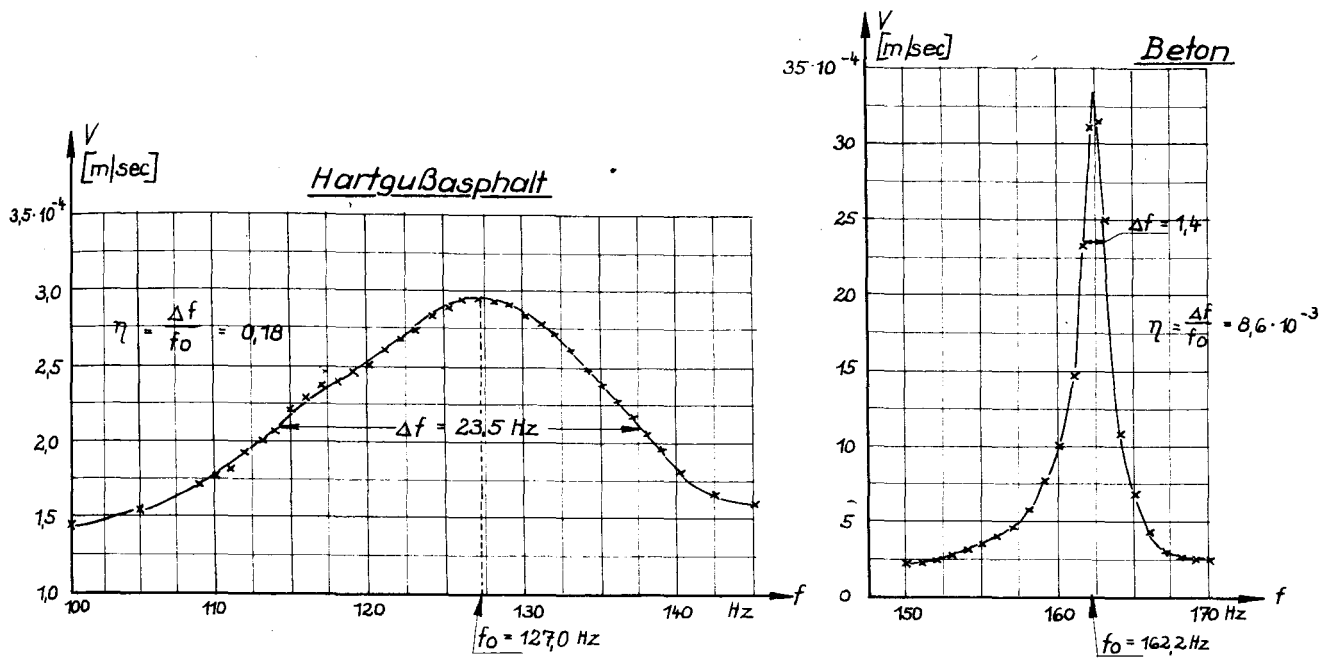


Abb. 22 Resonanzkurven von Hartgußasphalt und Beton

Die für die verschiedenen Baustoffe nach den genannten Meßverfahren erhaltenen Verlustzahlen sind in die Tafel 5 eingetragen.

T a f e l 5

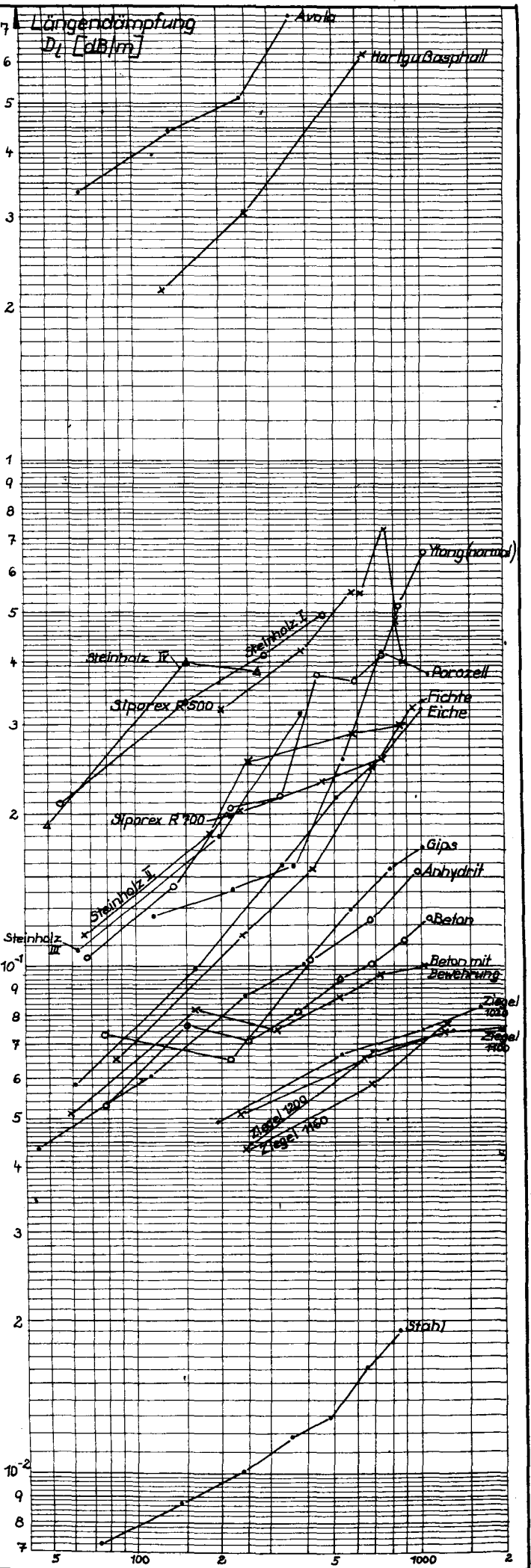
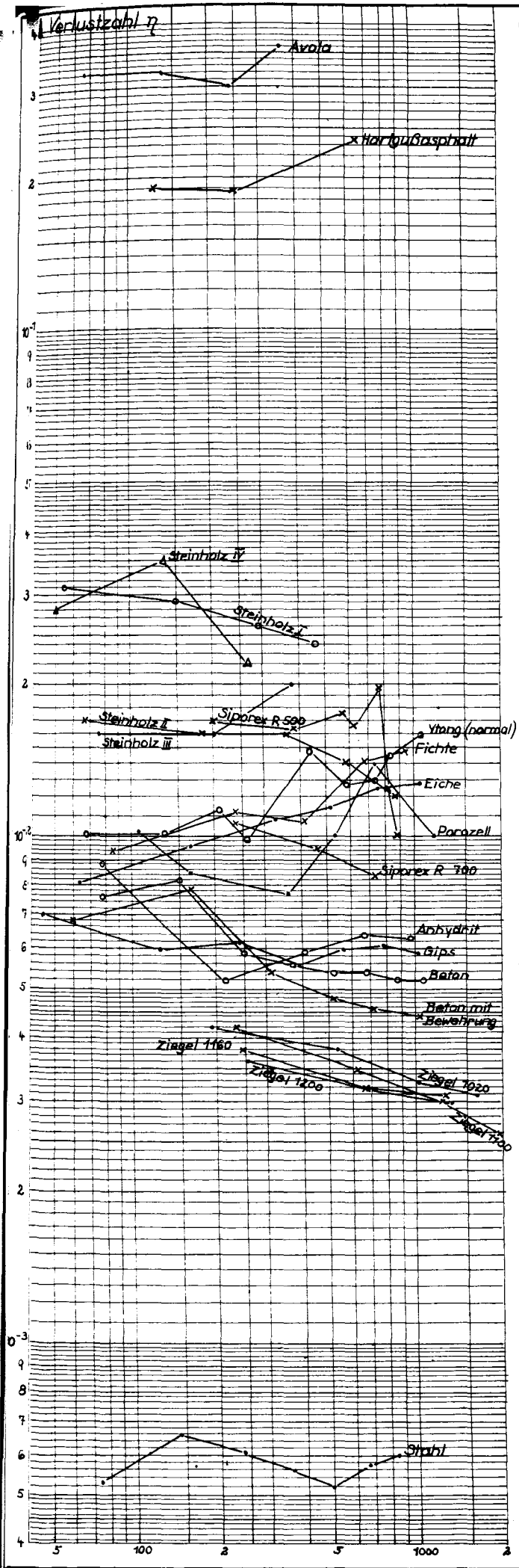
Baustoff	Meßverfahren	Verlustzahl η bei verschiedenen Frequenzwerten							
a Beton	f:	77	162	250	370	520	680	870	1070 Hz
	R :	7,9	8,6	5,7	5,4	5,2	5,3	5,2	$5,0 \cdot 10^{-3}$
	A :	7,3	7,8	6,1	5,8	5,6	5,5	5,2	$5,4 \cdot 10^{-3}$
b Beton mit Bewehrung	f:	59	158	318	520	720	1060	Hz	
	R :	7,8	8,4	5,6	4,8	4,1	$4,2 \cdot 10^{-3}$		
	A :	5,9	7,5	5,2	4,7	5,1	$4,6 \cdot 10^{-3}$		
c Gips	f:	45	126	243	395	570	780	1020	Hz
	R :	7,6	5,8	6,2	5,3	6,2	6,0	$5,7 \cdot 10^{-3}$	
	A :	6,4	6,2	6,1	5,9	5,8	6,2	$6,1 \cdot 10^{-3}$	
d Anhydrit	f:	79,3	215	414	678	988	Hz		
	R :	8,8	5,5	5,7	6,7	$6,1 \cdot 10^{-3}$			
	A :	8,9	4,9	6,1	6,1	$6,5 \cdot 10^{-3}$			
e Hartgußasphalt	f:	127	250	650	Hz				
	R :	0,18	0,19	0,23					
	A :	0,20	0,18	0,24					
f Gußasphalt ("Avola")	f:	66	137,5	242	360	Hz			
	R :	0,30	0,32	0,32	0,35				
	A :	0,34	0,31	0,28	0,37				
g Luftgeh. Porenbeton (Porozell)	f:	114,5	220,5	361,5	531	726	1186	Hz	
	R :	10,5	8,2	7,6	10,3	13,5	$9,8 \cdot 10^{-3}$		
	A :	9,9	8,8	7,8	9,9	14,5	$10,2 \cdot 10^{-3}$		

Fortsetzung

Fortsetzung

Baustoff	Meßver- fahren	Verlustzahl η bei verschiedenen Frequenzwerten									
Ziegelkörper Ziegel 1020 Ziegel 1100 Ziegel 1160 Ziegel 1200	f:	192	528	1005	1618	Hz					
	R	5,0	4,0	3,6	3,3	$\cdot 10^{-3}$					
	A	3,4	3,6	3,0	2,9	$\cdot 10^{-3}$					
	f:	232	634	1205	1948	Hz					
	R	5,2	4,0	3,2	2,5	$\cdot 10^{-3}$					
	A	3,2	3,0	2,8	2,7	$\cdot 10^{-3}$					
	f:	247	670	1267	Hz						
	R	3,7	3,5	3,0	$\cdot 10^{-3}$						
	A	3,9	2,9	3,2	$\cdot 10^{-3}$						
	f:	251	688	1308	Hz						
	R	4,1	3,3	2,8	$\cdot 10^{-3}$						
	A	3,1	3,1	3,2	$\cdot 10^{-3}$						
i Kalksandstein		-									
k Kalksand- Leichtstein		-									
dampfgeh. l Porenbeton (Ytong)	f:	68	123	216	321	436	598	732	848	1060	Hz
R	10,4	10,1	11,0	9,8	15,6	12,2	13,1	14,7	16,2	*	
A	9,8	10,5	11,8	10,0	14,2	13,4	12,9	14,3	15,8	*	
dampfgeh. m Porenbeton (Ytong) m. Mörtelschicht	f:	40	105	198	318	480	672	860	Hz		
R	13,4	9,5	12,2	11,5	12,8	15,7	14,2	$\cdot 10^{-3}$			
A	12,6	8,7	11,4	12,5	10,5	13,8	10,1	$\cdot 10^{-3}$			
dampfgeh. Poren- n beton (Siporex) R 500 R 700	f:	200	385	613	765	884	Hz				
R	19,0	17,5	16,5	20,2	10,5	$\cdot 10^{-3}$					
A	15,0	15,5	16,9	19,4	9,9	$\cdot 10^{-3}$					
f:	238	457	732	Hz							
R	11,4	9,9	8,6	$\cdot 10^{-3}$							
A	10,3	9,1	8,2	$\cdot 10^{-3}$							
° Eichenholz	f:	61	166	329	515	750	1050	Hz			
R	8,9	9,8	10,5	11,9	13,0	12,5	$\cdot 10^{-3}$				
A	7,9	9,4	11,3	10,9	12,0	13,1	$\cdot 10^{-3}$				
p Fichtenholz	f:	86	239	417	687	930	Hz				
R	8,9	11,8	10,2	14,5	14,4	$\cdot 10^{-3}$					
A	9,9	10,6	11,4	13,9	15,2	$\cdot 10^{-3}$					
q Steinholz Mischung I Mischung II Mischung III Mischung IV	f:	55	150	288	469	Hz					
R	3,1	2,9	2,6	2,4	$\cdot 10^{-2}$						
f:	67	184	355	576	855	Hz					
R	1,7	1,6	1,6	1,4	1,2	$\cdot 10^{-2}$					
f:	73	198	382	$\cdot 10^{-2}$							
R	1,6	1,6	2,0	$\cdot 10^{-2}$							
f:	50	137	260	$\cdot 10^{-2}$							
R	2,8	3,5	2,4	$\cdot 10^{-2}$							

*) 10^{-3} ; R = Resonanz; A = Abklingzeit.



Verlustzahlen und Längendämpfungen
in Abhängigkeit von der Frequenz

Abb. 23

Beim Vergleich der mit verschiedenen Methoden gewonnenen Verlustzahlen sind Abweichungen innerhalb der Einzelwerte bis etwa 10% feststellbar. Diese Abweichungen können bei Berücksichtigung der Natur der Baustoffe als zulässig bezeichnet werden, zumal bei Änderung des Feuchtigkeitsgehaltes die Verlustzahlen über diese Grenze hinaus variieren (s. Absatz 5.31).

Aus den Verlustzahlen läßt sich nach

$$D_1 = \frac{13,6 \cdot \eta}{\lambda} \text{ dB/m}$$

die Längendämpfung innerhalb des Materials berechnen.

Der Mittelwert der nach beiden Methoden erhaltenen Verlustzahlen, sowie die Längendämpfung sind in der folgenden Abb. 23 dargestellt.

Auch hier beziehen sich die für Eichen- und Fichtenholz angegebenen Dämpfungsgrößen auf eine Ausbreitungsrichtung der Biegewellen parallel zur Faserrichtung.

5.3 Abhängigkeit der Dämpfung von äußeren Einflüssen

Wie bei den dynamischen Elastizitätsuntersuchungen ist auch bei den Dämpfungsmessungen zu erwarten, daß hier die Verlustzahl eine Abhängigkeit von äußeren mechanischen Einflüssen und baulichen Variationen besitzt.

5.31 Einfluß der Feuchtigkeit

An einem Versuchskörper aus dampfgehärtetem Porenbeton (Ytong) konnte die Verlustzahl in Abhängigkeit vom Feuchtigkeitsgehalt bestimmt werden. Der größte Feuchtigkeitsgehalt betrug 53 Gew.-% (s. Absatz 4.31) und die Dämpfungsmessungen erfolgten bei abnehmender Feuchte in zeitlichen Abständen (s. Abb. 24). Mit größerem Feuchtigkeitsgehalt nimmt auch die Verlustzahl größere Werte an.

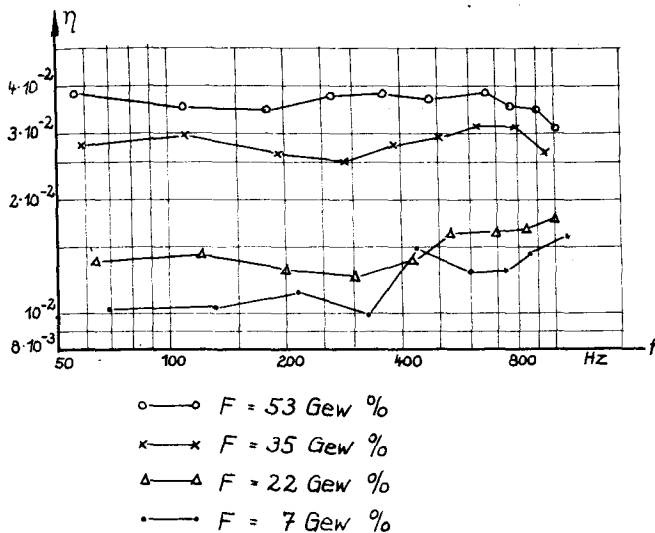


Abb. 24 Verlustzahlen des Porenbetons bei verschiedener Feuchtigkeit

schalldämmung bei relativ hohem Feuchtigkeitsgehalt der Bauelemente günstigere Werte annahm.

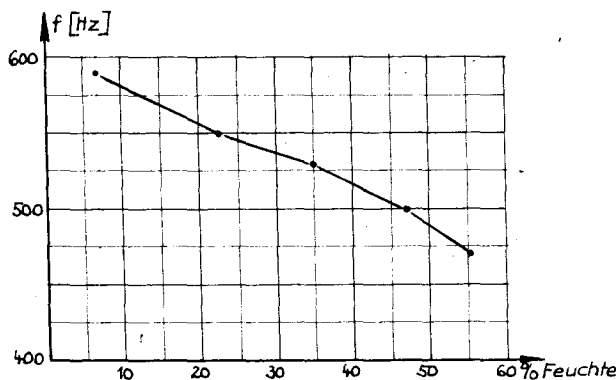


Abb. 25 Abhängigkeit einer Eigenfrequenz vom Feuchtigkeitsgehalt eines Versuchskörpers aus Porenbeton ("Ytong")

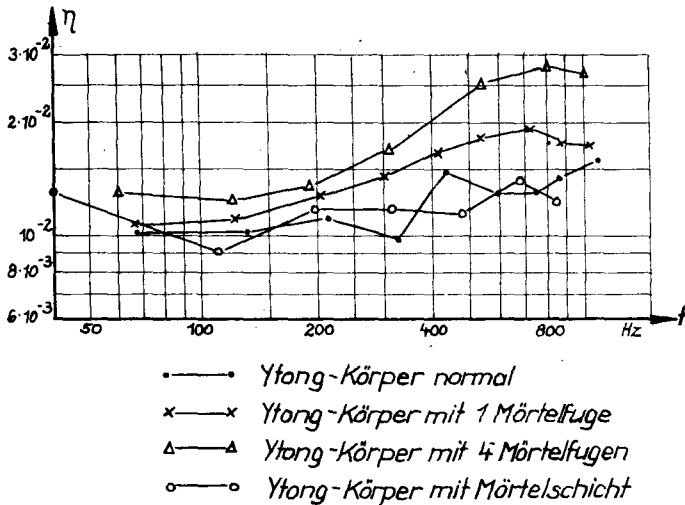
weiligen Resonanzfrequenz ist, um so größer sind die Verschiebungen der Resonanzfrequenzwerte bei unterschiedlichem Feuchtigkeitsgehalt. Es verschiebt sich beispielsweise für einen Stab aus Porenbeton eine Eigenfrequenz von etwa 500 Hz auf 600 Hz, wenn seine Feuchtigkeit von 53 Gew.-% auf 7 Gew.-% herabgesetzt wird (s. Abb. 25).

Die Abhängigkeit der Dämpfung vom Feuchtigkeitsgehalt kann bei Schalldämmungsmessungen an Neubauten und speziell bei Winterbauten von Bedeutung sein. In diesen Bauwerken liegt stets eine größere Feuchtigkeit vor, als in Bauten, die durch längeres Bewohnen bereits ausgetrocknet sind. So konnte wiederholt in der Praxis bestätigt werden, daß vor allem die Trittschall-

Nach Gleichung (8) in Abschnitt 3 wird die Resonanzfrequenz mitbestimmt durch die Dichte des jeweiligen Stoffes. Bei zunehmender Feuchtigkeit steigt naturgemäß die Dichte. Je größer die Dichte um so geringer ist die Resonanzfrequenz bei sonst gleich bleibenden mechanischen Eigenschaften. Je größer die Ordnungszahl n der je-

5.32 Einfluß von Mörtelschichten und Mörtelfugen

Die unter 5.2 angegebenen Verlustzahlen sind an den jeweiligen reinen Baustoffen gewonnen worden. Da aber diese Baustoffe in der Praxis vorwiegend mit Putzschichten oder Mörtelfugen verwendet werden, sollte der Einfluß dieser Bedingungen auf die Dämpfung festgelegt werden. Die benutzten Probekörper aus Porenbeton ("Ytong") sind bereits unter 4.3 beschrieben worden.



Wie aus der Abb. 26 zu entnehmen ist, wird die Verlustzahl des Ytong-körpers mit Mörtelschicht gegenüber der des normalen Ytong-Materials nur unwesentlich verändert. Dagegen nimmt die Dämpfung mit wachsender Anzahl der Mörtelfugen größere Werte an. Diese Dämpfungszunahme wird besonders deutlich im Frequenzgebiet oberhalb von 400 Hz.

Abb. 26 Verlustzahlen verschiedener Porenbetonkörper

An Ziegelkörpern mit Mörtelfugen konnten analoge Ergebnisse beobachtet werden.

5.4 Besprechung der Versuchsergebnisse

Die Verlustzahlen der untersuchten Baustoffe liegen etwa zwischen $3 \cdot 10^{-3}$ und $3 \cdot 10^{-1}$. Wie zu erwarten war, zeigen die Gußasphalte die größte Dämpfung, während die Verlustzahlen der übrigen Versuchskörper sich zwischen $3 \cdot 10^{-3}$ und etwa $3 \cdot 10^{-2}$ bewegen. Wie bereits bemerkt, sind die untersuchten Ziegelkörper gleichwertig mit Klinkern verschiedener Qualität. Für die handelsüblichen Mauerziegel Mz 150 ist eine größere Dämpfung zu erwarten, als für die verschiedenen Ziegelkörper angegeben wurde.

Wie bereits von Kuhl und Kaiser (22) festgestellt wurde, ist die nach den Ergebnissen der Dämpfungsmessungen berechnete

Absorption von Biegewellen in Wänden um den Faktor 20 bis 100 kleiner als die wirkliche Amplitudenabnahme von Körperschall in Bauten. Die Feststellung deckt sich mit zahlreichen Körperschalldämpfungsmessungen an Bauwerken (23). Auch bei diesen Messungen wurden größere Längendämpfungen längs der Wände erzielt. Während die in der Abb. 23 angegebenen Längendämpfungen für die normalen Baustoffe gelten, kommt bei der Verwendung dieser Baustoffe am Bauwerk einmal die durch Mörtelfugen verursachte höhere Dämpfung hinzu und zum anderen liegt in Bauten bei jedem Wandanschluß eine Stoßstellendämpfung vor, die von der Massenträgheit der die Stoßstellen bildenden Wände abhängig ist. Daher ergibt sich die wirkliche Gesamtdämpfung einer Wand im Bauwerk stets aus der Summe der Materialdämpfung, dem Dämpfungsbeitrag äußerer Einflüsse (Feuchtigkeit und Mörtelfugen) und der Stoßstellendämpfung.

6. Zusammenfassung

Es war das Ziel dieser Untersuchungen, die statischen und die dynamischen Elastizitätsmoduln einer größeren Anzahl von Baustoffen miteinander zu vergleichen, und den Verlustfaktor, d.h. die innere Dämpfung dieser Materialien zu bestimmen.

6.1 Statische Untersuchungen

Der statische Elastizitätsmodul wurde an Versuchskörpern der verschiedenen Baustoffe mit einem Querschnitt von 5 x 5 cm bestimmt. Mit Dehnungsmeßstreifen, die an mehreren Punkten der stabförmigen Versuchskörper angebracht waren, wurden die Längenänderungen bei Zugbeanspruchung gemessen. Die Ergebnisse sind in Tafel 2 (S. 25) wiedergegeben. Es konnte festgestellt werden, daß die Schwankungen der Längenänderungen von drei gleichartigen Versuchskörpern unter gleichen klimatischen Bedingungen unbedeutend sind. Dagegen war ein bedeutender Einfluß des Feuchtigkeitsgehaltes und der Alterungserscheinungen auf den statischen Elastizitätsmodul feststellbar.

Vor allem bei stark porösen Baustoffen, z.B. Porenbeton, sind die statischen Elastizitätseigenschaften eine Funktion des Feuchtigkeitsgehaltes. Der statische Elastizitätsmodul nimmt

mit steigendem Feuchtigkeitsgehalt kleinere Werte an. Die Alterungserscheinungen bei Beton sind auf die gleichen Ursachen zurückzuführen. Mit zunehmender Abbindezeit verliert sich der Wassergehalt, und damit steigt die Festigkeit des Betons und auch seine Elastizität. Die Abhängigkeit des statischen Elastizitätsmoduls von der Prismen- bzw. Würfel-druckfestigkeit konnte bereits von Mehmel, Ban und Yoshida (15, 16) festgestellt werden. Beim Beton bestand die Möglichkeit eine größere Festigkeit durch künstliche Alterung mit Infrarot-Bestrahlung zu erzielen.

Bei den fabrikmäßig hergestellten Baustoffen, z.B. dampfgehärtetem Porenbeton ("Ytong" und "Siporex"), Kalksandsteinen und Ziegelmateriale verschiedener Festigkeiten konnte keine Änderung der Elastizität mit dem Alter festgestellt werden.

Für die Praxis sind die beobachteten Alterungserscheinungen bedeutungsvoll. Sie sind zurückzuführen auf eine Lockerung der Gefügestruktur bei Wechselbeanspruchung, die bei Baustoffen mit geringerer Dichte ausgeprägter erscheint als bei Baustoffen mit größerer Dichte. Bei künstlicher Alterung, z.B. durch Schwingungsanregung, konnte ebenfalls eine Abnahme der statischen Elastizität beobachtet werden.

Einer Gefügelockerung, verursacht durch Temperaturspannungen oder Erschütterungen, sind die Baustoffe in der Praxis ständig unterworfen. Daher ist bei ihnen zu unterscheiden zwischen der Ursprungselastizität und der Elastizität, die nach einer Beanspruchung durch Wechselkräfte erreicht wird. Die nach einer Wechselbeanspruchung erzielte Elastizität wird stets geringer als die Ursprungselastizität sein.

Schließlich konnte beobachtet werden, daß bei einer Temperatur von etwa 100°C der Elastizitätsmodul des Betons gegenüber dem bei Raumtemperatur gemessenen um etwa 30% abnimmt. (s. Abs. 2.42, S. 29).

Aus den durchgeführten Messungen der Längenänderung an den verschiedenen Baustoffen läßt sich folgern, daß bei einer Zugbelastung die ideale zentrische Belastung sehr nahe verwirklicht wird. Bei einer Druckbeanspruchung treten

dagegen unübersichtliche Kräfteverteilungen in der den Druckstempel berührenden Baustoffzone auf. Darüber hinaus wächst die Knickgefahr mit der Schlankheit der Versuchskörper. Bei Baustoffen mit makroskopisch inhomogenem Aufbau, wie z.B. Beton ist für Längenänderungsmessungen ein Mindestquerschnitt zu fordern, um Meßunsicherheiten, die durch den Aufbau des Körpers bedingt sind, auszuschalten.

Die Längenänderungen der Baustoffe bei verschiedenen Belastungen, sind nur für den niedrigsten Spannungsbereich gewonnen. In diesem Gebiet ist die Proportionalität zwischen Spannung und Dehnung gut erfüllt.

Das angewandte Meßverfahren zur Bestimmung der Längenänderung (Dehnungsmeßbrücke) ist wegen der erzielbaren größeren Genauigkeit einem mechanischen Meßverfahren vorzuziehen.

6.2 Dynamische Untersuchungen

Im-Anschluß an die statische Bestimmung des Elastizitätsmoduls wurden an den Versuchskörpern der verschiedenen Baustoffe schwingungstechnische Untersuchungen angestellt. Sie sollten sowohl zur Bestimmung des dynamischen Elastizitätsmoduls als auch zur Bestimmung der Verlustzahl dienen. Aus den Eigenfrequenzen bzw. den Abklingzeiten lassen sich diese Werte nach den angegebenen Beziehungen für stabförmige Körper berechnen.

Wie ein Vergleich der auf statischem und dynamischem Wege (s. Tafel 4, S. 45) gewonnenen Elastizitätsmoduln zeigt, sind bei allen untersuchten Baustoffen, die dynamischen E-Moduln größer. Obwohl durch die erzwungenen Schwingungen eine gewisse Gefügelockerung eintritt, die auf Grund der statischen Untersuchungen eine Verminderung der Elastizität verursacht, ist dennoch ein größerer dynamischer Elastizitätsmodul feststellbar.

Der Einfluß der Feuchtigkeit auf den dynamischen Elastizitätsmodul ist von untergeordneter Bedeutung, dagegen vergrößern Mörtelfugen und auch Mörtelschichten die Elastizität der Versuchskörper (s. Abs. 4.3, S. 46). Daher werden in Wohnbauten Wand- oder Deckenelemente mit Mörtelfugen stets einen größeren dynamischen Elastizitätsmodul als

der natürliche (reine) Baustoff besitzen. Die Unterschiede sind mit Hilfe der durchgeführten Messungen abschätzbar.

Als Dämpfungsgröße konnte die Verlustzahl aus der Halbwertsbreite und auch aus den Abklingzeiten ermittelt werden. Für die Verlustzahl ist eine Frequenzabhängigkeit feststellbar. Baustoffe aus bitumenhaltigen Stoffen besitzen eine etwa um den Faktor 100 größere Verlustzahl als die übrigen Baustoffe, die wieder nach ihrem Raumgewicht in zwei Gruppen unterteilbar sind. Baustoffe mit geringerem Raumgewicht zeigen eine höhere Dämpfung als solche mit einer größeren Dichte. Die größere Dämpfung der leichteren Stoffe ist in erster Linie auf die erhöhte Porigkeit zurückzuführen. Bezugsmessungen wurden an Stahl vorgenommen, deren Ergebnisse gut mit Meßwerten anderer Autoren (9) übereinstimmen.

Bei Baustoffen relativ hoher Porosität nimmt die Dämpfung mit wachsendem Feuchtigkeitsgehalt zu. Die ebenfalls festgestellte Erhöhung der Dämpfung durch Mörtelfugen ist für die Körperschallausbreitung im Wohnungsbau bedeutungsvoll und bestätigt den Unterschied zwischen der natürlichen Materialdämpfung und der in der Praxis beobachteten Gesamtdämpfung entlang von Wänden.

Literaturverzeichnis

- 1.) Cremer, L. Theorie des Klopfeschalles bei Decken mit schwimmendem Estrich, ACUSTICA, 1952, 4, S. 167 - 178
- 2.) Cremer, L. Calculation of sound propagation in structures, ACUSTICA, 1953, 5, S.317-335
- 3.) Schoch, A. Der Schalldurchgang durch Platten ACUSTICA, 1952, 1, S. 1 - 17
- 4.) Gösele, K. Schallabstrahlung von Platten ACUSTICA, 1953, 4 S.243-248
- 5.) Westphal, W. Zur Schallabstrahlung einer zu Biegeschwingungen angeregten Wand, Akustische Beihefte, 1954, 2, S. 603 - 610
- 6.) Schmidt, R. Dämpfungsmessungen an Schallwellen in festen Körpern, Ing.Archiv 1934, 5 S.354
- 7.) Oberst, H. Über die Dämpfung von Biegeschwingungen dünner Bleche durch festhaftende Beläge Akustische Beihefte, 1952, 4 S.182-194
- 8.) Kurtze, G., Tamm, K., Vogel, S. Modellversuche zur Biege- wellendämmung an Ecken. ACUSTICA, 1955, 4, S.223-233
- 9.) Skudrzyk, E. Die Grundlagen der Akustik Springer Verlag Wien, 1954
- 10.) Kusakabe, S. Kinetic measurement of the moduls of elasticity, J. of the college of science, Tokio 1905
- 11.) Becker, G.W. Dissertation (Braunschweig 1954) Kolloid-Zeitschrift 140, 1955, 1
Koppelman, J. Über das dynamisch-elastische Verhalten hochpolymerer Stoffe Kolloid-Zeitschrift, 144, 1955, 12
- 12.) Ros, M. Die Materialtechnische Grundlagen und Probleme des Eisenbetons im Hinblick auf die zukünftige Gestaltung der Stahlbeton-Bauweise Bericht Nr. 162 der Eidgenössischen Materialprüfungs- und Versuchsanstalt Zürich, 1950
- 13.) Pucher, A. Lehrbuch des Stahlbetonbaues Springer Verlag Wien 1953
- 14.) Schleicher, F. Taschenbuch für Bauingenieure, Band I u. II Springer Verlag Berlin 1955
- 15.) Ban, Shizuo Der Ermüdungsvorgang von Beton Der Bauingenieur, 1933, 13/14, S.188-192
- 16.) Yoshida, H. Über das elastische Verhalten von Beton Springer Verlag Berlin 1930
- 17.) Cremer, L. Die wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik, Band III Hirzel Verlag Leipzig 1950, S. 176
- 18.) Timoschenko, S. Schwingungsprobleme der Technik Springer Verlag Berlin 1932

- 19.) Pohl, R.W. Einführung in die Optik
Springer Verlag Berlin 1943, S. 184
- 20.) Cremer, L. Patentschrift Nr. 932 696, Klasse 37d
vom 8.9.1955
- 21.) Cremer, L. Forschungsberichte für die Beratungsstelle
für Asphaltverwendung und Naturasphalt e.V.
Braunschweig vom 5.10.1952 u. 5.3.1953
- 22.) Kuhl, W., Kaiser, H. Absorption of structure-borne
sound in building materials without
and with sound-filled cavities.
ACUSTICA, 1952, 4 S. 179-188
- 23.) Bisher unveröffentlichte Untersuchungen des Instituts
für Baustoffkunde und Materialprüfung TH Braunschweig
- 24.) E. Meyer, P.H. Parkin, H. Oberst, H.J. Purkis
A tentative method for the measurement of
indirect sound transmission in buildings.
ACUSTICA 1, 17